



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Bruno Miguel Alves Coelho

**Deteção de defeitos em materiais
compósitos usando tecnologia de
ultrassons**

Dissertação de mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho realizado sob a orientação de:

Professor Doutor João Pedro Gil Nunes

Doutora Joana Mafalda Moura Malheiro

Janeiro de 2020

Despacho RT - 31 /2019 - Anexo 3

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-CompartilhaIgual

CC BY-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Agradecimentos

Desejo expressar o meu mais vivo agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a realização desta dissertação.

Agradeço ao Professor Doutor João Pedro Nunes, meu orientador, pela revisão crítica e disponibilidade que demonstrou ao longo do presente trabalho.

Agradeço à Doutora Joana Malheiro, minha coorientadora no Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP), por toda a disponibilidade, ensinamentos, rigor científico e revisão crítica ao longo deste trabalho.

Agradeço ao Miguel Vasconcelos, Rafael Alves e à Andreia Vilela, colaboradores do PIEP, pelas sugestões e colaboração prestada na parte experimental do trabalho.

Agradeço ao Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros pela cedência dos materiais e equipamentos necessários à execução desta dissertação.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Despacho RT - 31 /2019 - Anexo 4

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A utilização de materiais compósitos em aplicações estruturais comporta alguns desafios, pois a sua natureza heterogênea, resulta em mecanismos de dano complexos, sendo alguns tipos de defeito de difícil detecção a olho nu. O uso de técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END) neste tipo de materiais é de extrema importância, uma vez que, permite a detecção de defeitos de outro modo imperceptíveis.

Este trabalho tem como objetivo principal o uso da técnica de análise não destrutiva de ultrassons (UT) no estudo, avaliação e caracterização de defeitos em materiais compósitos de matriz polimérica. Para o efeito foi utilizado o equipamento *Prisma* da *Sonatest* do tipo *A-Scan* com sonda *Phased Array*. Tendo em conta a pretensão referida, numa primeira fase, foram produzidos diferentes laminados com defeitos impostos como furos e inclusões, recorrendo ao processo de produção por infusão de resina assistida a vácuo (VARI). No caso das furações, os resultados experimentais obtidos evidenciam uma pequena tendência para a diminuição da extensão da região delaminada com o aumento do diâmetro da broca. Por outro lado, o estudo efetuado sobre as inclusões mostra que, quanto menores forem as suas dimensões, maior é a facilidade dos ultrassons em “contorná-las”, tornando-se a superfície oposta do laminado menos esbatida.

Numa segunda fase, e utilizando o mesmo processo de produção, foram fabricados provetes de diferentes laminados sem defeitos, para análise UT de dois tipos de defeitos específicos: danos mecânicos e juntas adesivas. Os danos mecânicos foram induzidos por ação de diferentes solicitações mecânicas controladas como impacto e flexão, e caracterizados quanto à sua estrutura. As juntas adesivas (colagens entre laminados), por sua vez, foram avaliadas quanto à sua qualidade, tendo sido também submetidas a tensões mecânicas controladas, nomeadamente tração, de forma a causar danos nas juntas. Em relação aos resultados obtidos a partir da análise UT de laminados submetidos a solicitações de impacto de baixa energia e flexão, conclui-se que estas solicitações provocam um dano de formato cónico, verificando-se um fenómeno de crescimento das delaminações ao longo da espessura, à medida que a distância à superfície solicitada aumenta. Por último, constata-se que o dano induzido nas juntas origina uma descontinuidade no material, resultando em falhas no sinal de UT quer na interface substrato superior/adesivo quer no fundo do adesivo.

Palavras-chave: Defeitos, Ensaios não destrutivos, Materiais compósitos, Ultrassons, VARI.

Abstract

The use of composite materials in structural applications poses some challenges, as their heterogeneous nature results in complex damage mechanisms, with some types of defects difficult to detect with the naked eye. The use of Non-Destructive Testing (NDT) techniques in this type of material is extremely important, since it allows the detection of defects that are otherwise imperceptible.

This work has as main objective the use of the non-destructive ultrasound analysis (UT) technique in the study, evaluation and characterization of defects in polymeric matrix composite materials. For this purpose, *Sonatest Prisma* A-Scan equipment with Phased Array probe was used. In view of the above claim, in the first stage different laminates with defects imposed, such as, holes and inclusions, were produced using the vacuum assisted resin infusion (VARI) production process. In the case of defects produced by drilling, the experimental results obtained show a small tendency to decrease the extension of the delaminated region with the increase of the diameter of the drill. On the other hand, the study carried out on the inclusions shows that the smaller the dimensions, the greater the ease of ultrasound in “surrounding them” making the opposite surface of the laminate less blurred.

In a second phase, and using the same production process, specimens of different defect-free laminates were fabricated for UT analysis of two specific types of defects: mechanical damage and adhesive joints. Mechanical damage was induced by the action of different controlled mechanical stresses, such as, impact and bending, and characterized by its structure. Adhesive joints (glue between laminates), in turn, were evaluated for their quality, and were also subjected to controlled tensile stress, to cause damage to the joints. Regarding the results obtained from the UT analysis of laminates subjected to low energy impact and bending, it is concluded that these stresses cause damage of a conical shape, indicating a phenomenon of growth of delamination along the thickness, as that the distance to the requested surface increases. Finally, it appears that the damage induced in the joints causes a discontinuity in the material, resulting in flaws in the UT signal both at the upper substrate/adhesive interface and at the bottom of the adhesive.

Keywords: Composite materials, Defects, Non-destructive testing, Ultrasound, VARI.

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xviii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xx
1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Organização da dissertação	2
2. Revisão bibliográfica	4
2.1. Materiais compósitos.....	4
2.2. Matrizes	5
2.2.1. Resinas de epóxico.....	7
2.3. Reforços.....	8
2.3.1. Fibras de vidro	11
2.3.2. Fibras de carbono	12
2.4. Laminados	13
2.5. Processos de fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica	14
2.5.1. Infusão de resina assistida a vácuo (VARI)	14
2.6. Defeitos e danos em materiais compósitos	16
2.6.1. Principais defeitos gerados durante a fase de produção	17
2.6.2. Principais danos gerados em condições de serviço	19
2.6.2.1. Furação de materiais compósitos	20
2.6.2.2. Impacto em materiais compósitos	21
2.7. Ligações adesivas entre materiais compósitos	23
2.8. Ensaaios não destrutivos aplicados a materiais compósitos.....	25
2.8.1. Inspeção visual	26
2.9. Ultrassons.....	27
2.9.1. Introdução.....	27
2.9.2. Princípios básicos dos ultrassons.....	27

2.9.2.1. Modos de propagação das ondas sonoras	27
2.9.2.2. Propriedades dos materiais que afetam a velocidade do som	29
2.9.2.3. Atenuação acústica	30
2.9.2.4. Influência da interface na propagação das ondas sonoras	30
2.9.3. Equipamento de ultrassons	31
2.9.4. Métodos de inspeção por ultrassons	33
2.9.4.1. Método de reflexão	33
2.9.4.2. Método de transmissão	33
2.9.5. Tipos de sondas	34
2.9.5.1. Sondas de contacto	34
2.9.5.2. Sondas de imersão	34
2.9.6. Tipos de representação dos dados adquiridos durante a inspeção	35
2.9.6.1. Representação <i>A-Scan</i>	35
2.9.6.2. Representação <i>B-Scan</i>	35
2.9.6.3. Representação <i>C-Scan</i>	36
2.9.7. Padrões de calibração	36
2.9.7.1. Padrões de calibração para componentes metálicos	37
2.9.7.2. Padrões de calibração para componentes em material compósito	37
3. Metodologia experimental	39
3.1. Materiais	39
3.2. Infusão de resina assistida a vácuo (VARI)	39
3.2.1. Preparação do processo	40
3.2.2. Processamento por infusão de resina a vácuo	41
3.3. Dano na furação de laminados de fibra de vidro/epóxico	42
3.3.1. Produção e furação das placas	42
3.4. Preparação e processamento de laminado de fibra de vidro/epóxico contendo inclusões	44
3.5. Dano de impacto de baixa energia	50
3.5.1. Produção de provetes de laminados de fibra de vidro/epóxico e de carbono/epóxico	50
3.5.2. Ensaio de impacto de baixa energia	52
3.6. Dano induzido por ação de esforços de flexão	54
3.6.1. Fabrico de provetes de laminados de fibra de vidro/epóxico	54
3.6.2. Ensaio de flexão	56
3.7. Dano induzido por ação de esforços de tração em juntas adesivas	58

3.7.1. Materiais selecionados	58
3.7.2. Produção de laminado de fibra de vidro/epóxico para obtenção de substratos e <i>tabs</i>	58
3.7.3. Geometria das juntas de sobreposição simples	59
3.7.4. Preparação e execução das juntas adesivas.....	61
3.7.5. Ensaio de tração	64
3.8. Ensaio não destrutivo	65
3.8.1. Ultrassons.....	65
3.8.2. Equipamento de ensaio.....	65
3.8.3. Procedimento experimental adotado na inspeção das amostras	66
4. Resultados e discussão.....	67
4.1. Caracterização do dano na furação de laminados de fibra de vidro/epóxico	67
4.1.1. Análise do laminado constituído por furos não passantes	67
4.1.2. Análise do laminado constituído por furos passantes.....	76
4.2. Caracterização por ultrassons do laminado fibra de vidro/epóxico contendo inclusões..	82
4.3. Caracterização do dano de impacto de baixa energia	98
4.3.1. Análise do dano induzido nos laminados de fibra de vidro/epóxico.....	98
4.3.1.1. Inspeção visual	101
4.3.1.2. Análise por ultrassons	104
4.3.2. Análise do dano induzido nos laminados de carbono/epóxico	109
4.3.2.1. Inspeção visual	112
4.3.2.2. Análise por ultrassons	114
4.4. Caracterização do dano induzido por ação de solicitações de flexão em laminados de fibra de vidro/epóxico.....	119
4.4.1. Inspeção visual	121
4.4.2. Inspeção por ultrassons.....	123
4.5. Caracterização do dano induzido por ação de solicitações de tração em juntas adesivas de sobreposição simples.....	127
4.5.1. Inspeção visual	130
4.5.2. Análise por ultrassons	133
5. Conclusões	141
6. Sugestões para trabalhos futuros	145
Bibliografia.....	146
Anexos.....	152

Anexo A	152
Anexo B	153
Anexo C	154
Anexo D	155
Anexo E	157
Anexo F	158
Anexo G	159
Anexo H	160

Lista de Figuras

Figura 1: Material compósito (adaptado de [1]).	4
Figura 2: Representação esquemática de um polímero termoplástico (adaptado de [11]).	5
Figura 3: Representação esquemática de um polímero termoendurecível (adaptado de [11]).	6
Figura 4: Tecido unidirecional (adaptado de [1]).	9
Figura 5: Tecido tafetá (adaptado de [1]).	10
Figura 6: Tecido sarja (adaptado de [1]).	10
Figura 7: Tecido cetim (adaptado de [1]).	10
Figura 8: Exemplo de uma sequência de empilhamento e designação correspondente (adaptado de [1]).	14
Figura 9: Ilustração do processo VARI (adaptado de [8]).	15
Figura 10: Vazios e porosidade (adaptado de [18]).	18
Figura 11: Representação esquemática de uma ruga, inclusão, bem como, de outros defeitos (adaptado de [26]).	18
Figura 12: Dano de impacto de baixa velocidade (adaptado de [30]).	22
Figura 13: Dano de impacto de alta velocidade (adaptado de [30]).	22
Figura 14: Tipos de juntas adesivas mais comuns - (a) sobreposição simples; (b) sobreposição dupla; (c) reforço simples; (d) reforço duplo; (e) degrau; (f) rampa (adaptado de [11]).	24
Figura 15: Modos de rotura em juntas adesivas - (a) rotura adesiva; (b) rotura coesiva; (c) rotura mista (adaptado de [11]).	25
Figura 16: Método de reflexão (adaptado de [11]).	33
Figura 17: Método de transmissão (adaptado de [11]).	34
Figura 18: Representação A-Scan - (A) e (C) Ecos relativos à reflexão das ondas de ultrassom pela superfície e parede de fundo do componente, respetivamente; (B) Eco relativo a um defeito (adaptado de [11]).	35
Figura 19: Representação B-Scan dos defeitos do componente em inspeção (adaptado de [11]).	36
Figura 20: Representação C-Scan dos defeitos do componente em inspeção (adaptado de [11]).	36
Figura 21: Padrões de calibração para componentes metálicos (adaptado de [49]).	37
Figura 22: Bloco de calibração ST8871 utilizado pela Boeing (adaptado de [51]).	38
Figura 23: Padrões de calibração utilizados pelas companhias aéreas, na inspeção não destrutiva dos seus aviões (adaptado de [51]).	38
Figura 24: Bloco de calibração G11 Phenolic (adaptado de [52]).	38
Figura 25: Impregnação de fibras de vidro através da infusão de resina de epóxido.	41
Figura 26: Placa de fibra de vidro/epóxido fabricada através do processo de produção VARI.	42
Figura 27: Brocas helicoidais de vários diâmetros, usadas nas operações de furação.	42
Figura 28: Disposição dos furos executados no laminado F_1.	43
Figura 29: Disposição dos furos executados no laminado F_2.	43
Figura 30: Materiais inseridos de forma deliberada entre as camadas de fibra de vidro.	45
Figura 31: Desenho 3D do Step Block com cinco variações de espessura.	45
Figura 32: Espessura de cada escada após o empilhamento das camadas de fibra de vidro.	46
Figura 33: Disposição das inclusões no laminado.	47

Figura 34: Laminado C_1 contendo inclusões de várias dimensões, distribuídas por cinco zonas de diferente espessura, sendo esta crescente do lado direito da figura, para o lado esquerdo.	49
Figura 35: Amostras para ensaios de impacto de baixa energia - (a) provetes de fibra de vidro/epóxico; (b) provetes de carbono/epóxico.	50
Figura 36: Dispositivo de ensaio por queda de peso CEAST Fractovis Plus.	53
Figura 37: Provetes de fibra de vidro/epóxico para ensaios de flexão em três pontos.	55
Figura 38: Ensaio de flexão em três pontos (adaptado de [4]).	57
Figura 39: Dispositivo de ensaio de flexão Shimadzu AGS-X.	57
Figura 40: Substratos e tabs de fibra de vidro/epóxico para a execução de juntas adesivas de sobreposição simples.	59
Figura 41: Junta adesiva de sobreposição simples.	59
Figura 42: Desenho 2D de uma junta de sobreposição simples com área de sobreposição de 25×25,5 mm ²	60
Figura 43: Desenho 2D de uma junta adesiva de área de sobreposição de 50×25,5 mm ²	60
Figura 44: Desenho 2D de um dos gabarits.	61
Figura 45: Assembly dos dois gabarits.	61
Figura 46: Aspeto final dos gabarits após terem sido maquinados a laser.	62
Figura 47: Colagem dos substratos e tabs.	63
Figura 48: Aspeto final dos provetes, após a cura do adesivo.	63
Figura 49: Dispositivo de ensaio de tração MTS Criterion® Model 45.	65
Figura 50: Equipamento Prisma do tipo A-Scan da Sonatest.	66
Figura 51: Laminado F_1 com furos não passantes de diâmetros distintos - (a) superfície frontal da placa; (b) face oposta da placa.	67
Figura 52: Delaminação à entrada dos furos, resultante da operação de furação - (a) furo C4 de diâmetro 2,5 mm; (b) furo C8 de diâmetro 4,5 mm.	68
Figura 53: Variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca.	69
Figura 54: (a) Furo A4 de diâmetro 11 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo A4.	70
Figura 55: (a) Furo A3 de diâmetro 10 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo A3.	70
Figura 56: (a) Furo A2 de diâmetro 9 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo A2.	70
Figura 57: (a) Furo B2 de diâmetro 8 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo B2.	71
Figura 58: (a) Furo B3 de diâmetro 7,5 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo B3.	71
Figura 59: (a) Furo B4 de diâmetro 7 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo B4.	71
Figura 60: (a) Furo B5 de diâmetro 6,5 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo B5.	71
Figura 61: (a) Furo B8 de diâmetro 5 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo B8.	72
Figura 62: (a) Furo C7 de diâmetro 4 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo C7.	72
Figura 63: (a) Furo C5 de diâmetro 3 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo C5.	72
Figura 64: a) Furo A1 de diâmetro 1 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo A1.	72
Figura 65: L-Scan e A-Scan do furo B5 de diâmetro 6,5 mm.	73
Figura 66: Obtenção do diâmetro do furo B1.	75
Figura 67: Laminado F_2 com furos passantes de diâmetros distintos – (a) face frontal da placa; (b) face oposta da placa.	76

Figura 68: Delaminação à saída e à entrada dos furos D4 (diâmetro 11 mm), D3 (diâmetro 10 mm), E1 (diâmetro 8,5 mm) e E2 (diâmetro 8 mm), do lado esquerdo para o lado direito da figura.....	77
Figura 69: Variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca.	78
Figura 70: (a) Furo D1 de diâmetro 1 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo D1.....	79
Figura 71: (a) Furo D6 de diâmetro 1 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo D6.....	79
Figura 72: (a) Furo F3 de diâmetro 2 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo F3.....	79
Figura 73: (a) Furo F7 de diâmetro 4 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo F7.....	80
Figura 74: (a) Furo E5 de diâmetro 6,5 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo E5.....	80
Figura 75: (a) Furo E1 de diâmetro 8,5 mm; (b) L-Scan e A-Scan do furo E1.....	80
Figura 76: Obtenção do diâmetro do furo D1.....	81
Figura 77: (a) Inclusão de peel ply de dimensões 10×10 mm ² colocada na zona de espessura 3,13 mm; (b) inclusão de peel ply de dimensões 4×4 mm ² colocada na zona de espessura 4,04 mm.	84
Figura 78: (a) Inclusão de peel ply de dimensões 3×3 mm ² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de peel ply de dimensões 6×6 mm ² colocada na zona de espessura 6,95 mm.	84
Figura 79: (a) Inclusão de peel ply de dimensões 5×5 mm ² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de peel ply de dimensões 7×7 mm ² colocada na zona de espessura 8,60 mm.	84
Figura 80: (a) Inclusão de fita adesiva de dimensões 8×8 mm ² colocada na zona de espessura 3,13 mm; (b) inclusão de fita adesiva de dimensões 10×10 mm ² colocada na zona de espessura 4,04 mm.....	85
Figura 81: (a) Inclusão de fita adesiva de dimensões 3×3 mm ² colocada na zona de espessura 4,04 mm; (b) inclusão de fita adesiva de dimensões 5×5 mm ² colocada na zona de espessura 6,95 mm.....	85
Figura 82: (a) Inclusão de fita adesiva de dimensões 4×4 mm ² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de fita adesiva de dimensões 6×6 mm ² colocada na zona de espessura 8,60 mm.....	85
Figura 83: (a) Inclusão de PET/Al/PE de dimensões 10×10 mm ² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de PET/Al/PE de dimensões 7×7 mm ² colocada na zona de espessura 3,13 mm.....	86
Figura 84: (a) Inclusão de PET/Al/PE de dimensões 3×3 mm ² colocada na zona de espessura 3,13 mm; (b) inclusão de PET/Al/PE de dimensões 8×8 mm ² colocada na zona de espessura 4,04 mm.....	86
Figura 85: Inclusão de PET/Al/PE de dimensões 4×4 mm ² colocada na zona de espessura 6,95 mm.....	86
Figura 86: (a) Inclusão de alumínio de dimensões 8×8 mm ² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de alumínio de dimensões 6×6 mm ² colocada na zona de espessura 3,13 mm.	87
Figura 87: (a) Inclusão de alumínio de dimensões 3×3 mm ² colocada na zona de espessura 3,13 mm; (b) inclusão de alumínio de dimensões 7×7 mm ² colocada na zona de espessura 4,04 mm.	87

Figura 88: Inclusão de alumínio de dimensões 10×10 mm ² colocada na zona de espessura 6,95 mm.....	87
Figura 89: (a) Inclusão de filme de vácuo de dimensões 10×10 mm ² colocada na zona de espessura 8,60 mm; (b) inclusão de filme de vácuo de dimensões 5×5 mm ² colocada na zona de espessura 3,13 mm.	88
Figura 90: (a) Inclusão de filme de vácuo de dimensões 6×6 mm ² colocada na zona de espessura 4,04 mm; (b) inclusão de filme de vácuo de dimensões 3×3 mm ² colocada na zona de espessura 8,60 mm.....	88
Figura 91: (a) Inclusão de filme de vácuo de dimensões 7×7 mm ² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de filme de vácuo de dimensões 8×8 mm ² colocada na zona de espessura 6,95 mm.....	88
Figura 92: (a) Inclusão de Teflon™ de dimensões 8×8 mm ² colocada na zona de espessura 8,60 mm; (b) inclusão de Teflon™ de dimensões 4×4 mm ² colocada na zona de espessura 3,13 mm.	89
Figura 93: (a) Inclusão de Teflon™ de dimensões 5×5 mm ² colocada na zona de espessura 4,04 mm; (b) inclusão de Teflon™ de dimensões 3×3 mm ² colocada na zona de espessura 6,95 mm.	89
Figura 94: (a) Inclusão de Teflon™ de dimensões 6×6 mm ² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de Teflon™ de dimensões 7×7 mm ² colocada na zona de espessura 6,95 mm.	89
Figura 95: Zona de provável localização da inclusão de PET/Al/PE de dimensões 5×5 mm ² . 91	91
Figura 96: Obtenção por UT da profundidade e dimensões da inclusão de PET/Al/PE, de dimensões nominais 7×7 mm ² colocada na zona de espessura 3,13 mm.....	92
Figura 97: Gráfico Força (N) – Tempo (ms) relativo às placas 1, 5 e 10.....	99
Figura 98: Gráfico Energia (J) – Tempo (ms) relativo às placas 1, 5 e 10.....	99
Figura 99: Evolução do dano nos laminados de fibra de vidro/epóxico sujeitos a impactos de energia entre 2 J e 80,3 J.....	101
Figura 100: Evolução do dano nos laminados de fibra de vidro/epóxico sujeitos a impactos de energia entre 1 J e 1,74 J.....	102
Figura 101: Visualização a partir do microscópio ótico da região delaminada causada pelo impacto de energia 1 J na placa 5.	103
Figura 102: Variação da área de delaminação em função da energia de impacto.....	103
Figura 103: Scans relativos à Placa 1 – (a) antes do impacto de energia 10 J; (b) após impacto de energia 10 J.	105
Figura 104: Scans relativos à Placa 2 – (a) antes do impacto de energia 5 J; (b) após impacto de energia 5 J.	105
Figura 105: Scans relativos à Placa 3 – (a) antes do impacto de energia 2,5 J; (b) após impacto de energia 2,5 J.	105
Figura 106: Scans relativos à Placa 7 – (a) antes do impacto de energia 2 J; (b) após impacto de energia 2 J.	106
Figura 107: Scans relativos à Placa 9 – (a) antes do impacto de energia 1,74 J; (b) após impacto de energia 1,74 J.	106
Figura 108: Scans relativos à Placa 6 – (a) antes do impacto de energia 1,5 J; (b) após impacto de energia 1,5 J.	106

Figura 109: Scans relativos à Placa 8 – (a) antes do impacto de energia 1,26 J; (b) após impacto de energia 1,26 J.	106
Figura 110: Scans relativos à Placa 5 – (a) antes do impacto de energia 1 J; (b) após impacto de energia 1 J.	107
Figura 111: Obtenção das dimensões do dano causado pelo impacto de energia 10 J na placa 1.	108
Figura 112: Variação do comprimento do dano cônico em função da energia de impacto. ..	108
Figura 113: Gráfico Força (N) – Tempo (ms) relativo às amostras de carbono/epóxico, submetidas aos impactos de baixa energia.	110
Figura 114: Gráfico Energia (J) – Tempo (ms) relativo às amostras de carbono/epóxico, submetidas aos impactos de baixa energia.	110
Figura 115: Superfície frontal dos laminados submetidos aos impactos de energia 4 J, 4,5 J e 4,75 J.	112
Figura 116: Superfície frontal dos laminados submetidos aos impactos de energia 5 J, 5,5 J, 6 J e 7,5 J.	113
Figura 117: Superfície frontal e oposta dos laminados submetidos aos impactos de energia 10 J e 80,3 J.	113
Figura 118: Visualização das fissuras matriciais presentes no laminado CF_Plate_2, resultantes do impacto de energia 10 J, com o recurso a um microscópio ótico.	114
Figura 119: Scans relativos à amostra CF_Plate_2 – (a) antes do impacto de energia 10 J; (b) após o impacto de energia 10 J.	115
Figura 120: Scans relativos à amostra CF_Plate_4 – (a) antes do impacto de energia 7,5 J; (b) após o impacto de energia 7,5 J.	116
Figura 121: Scans relativos à amostra CF_Plate_5 – (a) antes do impacto de energia 6 J; (b) após o impacto de energia 6 J.	116
Figura 122: Scans relativos à amostra CF_Plate_6 – (a) antes do impacto de energia 5,5 J; (b) após o impacto de energia 5,5 J.	116
Figura 123: Scans relativos à amostra CF_Plate_9 – (a) antes do impacto de energia 5 J; (b) após o impacto de energia 5 J.	116
Figura 124: Scans relativos à amostra CF_Plate_10 – (a) antes do impacto de energia 4,75 J; (b) após o impacto de energia 4,75 J.	117
Figura 125: Scans relativos à amostra CF_Plate_7 – (a) antes do impacto de energia 4,5 J; (b) após o impacto de energia 4,5 J.	117
Figura 126: Scans relativos à amostra CF_Plate_8 – (a) antes do impacto de energia 4 J; (b) após o impacto de energia 4 J.	117
Figura 127: Variação do comprimento do dano cônico em função da energia de impacto. ..	118
Figura 128: Gráfico força (N) – deslocamento (mm) relativo aos provetes submetidos aos ensaios de flexão em três pontos.	120
Figura 129: Evolução do dano nos laminados de fibra de vidro/epóxico submetidos a cargas entre 815 N e 970 N.	121
Figura 130: Evolução do dano nos laminados de fibra de vidro/epóxico sujeitos a cargas entre 652 N e 797 N.	122
Figura 131: Scans relativos à amostra Placa F – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 652 N.	124

Figura 132: Scans relativos à amostra Placa H – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 680 N.....	124
Figura 133: Scans relativos à amostra Placa I – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 744 N.....	124
Figura 134: Scans relativos à amostra Placa B – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 764 N.....	125
Figura 135: Scans relativos à amostra Placa D – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 797 N.....	125
Figura 136: Scans relativos à amostra Placa C – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 815 N.....	125
Figura 137: Scans relativos à amostra Placa G – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 827 N.....	125
Figura 138: Scans relativos à amostra Placa E – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 849 N.....	126
Figura 139: Scans relativos à amostra Placa J – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 970 N.....	126
Figura 140: Variação do comprimento do dano cónico em função da força aplicada.	127
Figura 141: Curvas força (kN) – deslocamento (mm) relativas às juntas de área de sobreposição 50×25,5 mm².....	128
Figura 142: Curvas força (kN) – deslocamento (mm) referentes às juntas de área de sobreposição 25×25,5 mm².....	128
Figura 143: Superfícies de rotura dos provetes P1, P2 e P5.	130
Figura 144: Provetes P3 e P4 com as suas juntas danificadas.	131
Figura 145: Superfícies de rotura dos provetes P7 e P10.	131
Figura 146: Provetes P6, P8 e P9 com as suas juntas danificadas.	132
Figura 147: Scans relativos à junta P1 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.	134
Figura 148: Scans relativos à junta P2 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.	134
Figura 149: Scans relativos à junta P5 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.	135
Figura 150: Scans relativos à junta P7 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.	135
Figura 151: Scans relativos à junta P10 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.	135
Figura 152: Scans relativos à junta P3 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.	136
Figura 153: Scans relativos à junta P3 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.	136
Figura 154: Scans relativos à junta P4 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.	137
Figura 155: Scans relativos à junta P4 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.	137

Figura 156: Scans relativos à junta P6 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.	137
Figura 157: Scans relativos à junta P6 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.	137
Figura 158: Scans relativos à junta P8 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.	138
Figura 159: Scans relativos à junta P8 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.	138
Figura 160: Scans relativos à junta P9 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.	138
Figura 161: Scans relativos à junta P9 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.	138
Figura 162: Scans relativos à junta P2 – (a) lado A da junta; (b) lado B da junta.	139
Figura 163: Desenho técnico 2D relativo ao laminado constituído por furos não passantes (dimensões em mm).	152
Figura 164: Desenho técnico 2D relativo ao laminado constituído por furos passantes (dimensões em mm).	153
Figura 165: Desenho técnico 2D relativo ao laminado C_1 (dimensões em mm).	154
Figura 166: Resultados relativos à análise UT de um laminado de fibra de vidro/epóxico - (a) L-Scan; (b) A-Scan.	155
Figura 167: Distribuição das vistas B-Scan, C-Scan e L-Scan numa perspetiva 3D.	156
Figura 168: Escala de amplitude do sinal de UT.	156

Lista de Tabelas

Tabela 1: Propriedades típicas das resinas de epóxico (adaptado de [11]).	8
Tabela 2: Propriedades típicas das fibras de vidro do tipo E e S (adaptado de [11]).	12
Tabela 3: Propriedades típicas das fibras de carbono do tipo HS, IM e UHM (adaptado de [14]).	13
Tabela 4: Aplicações do processo VARI (adaptado de [22]).	16
Tabela 5: Vantagens e desvantagens da inspeção visual (adaptado de [41]).	27
Tabela 6: Modo de vibração das partículas materiais nas ondas longitudinais, transversais, Rayleigh e Lamb (adaptado de [43]).	28
Tabela 7: Designação dos furos e respetivo diâmetro.	44
Tabela 8: Operação de corte das camadas de tecido tafetá.	46
Tabela 9: Localização das inclusões em termos de camadas e respetivas dimensões.	48
Tabela 10: Espessuras finais das zonas S1, S2, S3, S4 e S5.	49
Tabela 11: Dimensões e espessura média de cada provete de fibra de vidro/epóxico.	51
Tabela 12: Dimensões e espessura média de cada provete de carbono/epóxico.	52
Tabela 13: Dimensões e espessura média de cada provete de fibra de vidro/epóxico.	56
Tabela 14: Principais dimensões das juntas adesivas de área de sobreposição de 25×25,5 mm ² .	60
Tabela 15: Principais dimensões das juntas adesivas de área de sobreposição de 50×25,5 mm ² .	60
Tabela 16: Espessura média dos substratos de fibra de vidro/epóxico, bem como, a espessura do adesivo.	64
Tabela 17: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais no laminado F_1.	69
Tabela 18: Profundidade de cada furo maquinado dada por ultrassons.	74
Tabela 19: Diâmetros estimados por ultrassons e diâmetros nominais da broca.	75
Tabela 20: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais no laminado F_2.	78
Tabela 21: Diâmetro de cada furo maquinado dado por UT.	82
Tabela 22: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais no laminado C_1.	83
Tabela 23: Composição dos materiais inseridos no laminado C_1.	90
Tabela 24: Profundidade e dimensões das inclusões inseridas na zona S1.	93
Tabela 25: Profundidade e dimensões das inclusões colocadas na zona S2.	94
Tabela 26: Profundidade e dimensões das inclusões inseridas na zona S3.	95
Tabela 27: Profundidade e dimensões das inclusões introduzidas na zona S4.	96
Tabela 28: Profundidade e dimensões das inclusões inseridas na zona S5.	97
Tabela 29: Espessura média dos materiais introduzidos no laminado C_1.	98
Tabela 30: Valores de energia de impacto calculados para os laminados de fibra de vidro/epóxico.	98
Tabela 31: Valores de força máxima de impacto e energia absorvida, obtidos para os laminados de fibra de vidro/epóxico, sujeitos aos impactos de energia 1 J, 10 J e 80,3 J.	100

Tabela 32: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais nos laminados de fibra de vidro/epóxico, antes e após a realização dos ensaios de impacto.	104
Tabela 33: Valores de energia de impacto calculados para os laminados de carbono/epóxico.	109
Tabela 34: Valores de força máxima de impacto e de energia absorvida obtidos para os laminados de carbono/epóxico, sujeitos aos impactos de energia entre 4 J e 80,3 J.	111
Tabela 35: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais nos laminados de carbono/epóxico, antes e após a realização dos ensaios de impacto.	115
Tabela 36: Comprimento do dano cônico dado por UT, em função da energia de impacto e da energia absorvida.	119
Tabela 37: Resultados experimentais obtidos para os provetes sujeitos aos ensaios de flexão.	120
Tabela 38: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais nos provetes de fibra de vidro/epóxico, antes e após a realização dos ensaios de flexão.	123
Tabela 39: Resultados experimentais obtidos para as juntas de área de sobreposição de 50×25,5 mm ² e 25×25,5 mm ²	129
Tabela 40: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais nas juntas adesivas, antes e após a realização dos ensaios de tração.	133
Tabela 41: Espessura do adesivo dado por UT para cada provete.	140
Tabela 42: Variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca.	157
Tabela 43: Variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca.	158
Tabela 44: Variação da área de delaminação em função da energia de impacto.	159
Tabela 45: Comprimento do dano cônico dado por UT, em função da energia de impacto. .	159
Tabela 46: Variação do comprimento do dano cônico obtido por UT, em função da força aplicada.	160

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

PIEP – Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros

END – Ensaios Não Destrutivos

UT – Ultrassons

VARI – Infusão de Resina Assistida a Vácuo

PAN – Poliacrilonitrilo

HS – Elevada Resistência

IM – Módulo Intermédio

HM – Módulo Elevado

UHM – Módulo Muito Elevado

RTM – Moldação por Transferência de Resina

BVID – Dano de Impacto Pouco Visível

NDT – Testes Não Destrutivos

NDE – Avaliação Não Destrutiva

IIW – Instituto Internacional de Soldadura

AWS – Sociedade Americana de Soldadura

ASTM – Sociedade Americana de Testes e Materiais

PET – Poli(tereftalato de etileno)

Al – Alumínio

PE – Polietileno

ISO – Organização Internacional de Padronização

PMMA – Poli(metacrilato de metilo)

F_d – Fator de delaminação

E_{PG} – Energia potencial gravítica

E – Módulo de elasticidade

ρ – Massa volúmica

1. Introdução

Os materiais compósitos caracterizam-se por ser heterogéneos, pois consistem na combinação macroscópica de dois ou mais materiais com propriedades distintas, sendo que, apresentam melhores propriedades do que cada um dos seus constituintes considerados em separado [1]. Por outro lado, os materiais compósitos são normalmente anisotrópicos, o que significa que as suas propriedades mecânicas, físicas, térmicas ou elétricas num ponto do material alteram em função da direção [2].

Os materiais compósitos desempenham um papel vital e real na qualidade de vida das pessoas no século XXI, na medida em que as suas características como, por exemplo, as elevadas resistência específica à rotura e rigidez, baixa densidade e uma boa resistência à corrosão, têm permitido responder aos desafios colocados pelo mercado global [3]. Este conjunto de propriedades são de extrema importância para diversos domínios como o aeroespacial, aeronáutico, defesa, transportes e componentes eletrónicos, sendo cada vez maior o recurso a estes materiais [4].

A crescente aplicação dos materiais compósitos em componentes estruturais obriga a que se proceda a uma investigação científica cada vez mais profunda, devido à sua natureza heterogénea, que torna os mecanismos de falha complexos [5]. É essencial entender os mecanismos de dano destes materiais, resultantes de defeitos gerados durante o processo de fabrico ou em condições de serviço. Para se assegurar a integridade dos componentes em material compósito durante todo o seu ciclo de vida, torna-se necessária uma monitorização da sua deterioração, através de técnicas de ensaios não destrutivos. Estas permitem a deteção de defeitos impercetíveis numa inspeção visual e sem induzir danos na peça a inspecionar. Por exemplo, a delaminação é o tipo de dano mais importante nos compósitos, pois é invisível a olho nu e a sua evolução tem um efeito prejudicial na resistência e rigidez, podendo resultar na rotura catastrófica do material [6].

Um dos métodos de controlo não destrutivo mais empregues na inspeção de estruturas em material compósito é a técnica de ultrassons, uma vez que, esta é capaz de detetar defeitos/danos internos não visíveis como, por exemplo, inclusões ou delaminação, que causam alterações na atenuação acústica e velocidade das ondas de ultrassom [5]. É justamente neste âmbito que se inclui o principal objetivo desta dissertação: a partir do uso da técnica de ultrassons, procura-se estudar, avaliar e caracterizar defeitos em materiais compósitos.

1.1. Objetivos

Como foi referido, este trabalho tem por objetivo fundamental estudar, avaliar e caracterizar defeitos em materiais compósitos utilizando a técnica de inspeção não destrutiva de ultrassons. Para além desta pretensão mencionada, são também objetivos específicos deste trabalho:

- Analisar por inspeção visual e ultrassons, o dano provocado pela execução de furos passantes e não passantes em laminados de fibra de vidro/epóxico, assim como, comparar os diâmetros de broca com a extensão da delaminação;
- Perceber o efeito que diferentes materiais, incluindo materiais utilizados no processo de infusão de resina assistida a vácuo causam no sinal de UT;
- Estudar o dano resultante de solicitações mecânicas como impacto de baixa energia e flexão em laminados de matriz polimérica, através da realização de ensaios não destrutivos, por inspeção visual e ultrassons;
- Investigar o efeito de diferentes níveis de energia de impacto (ensaios de impacto) e de forças de carregamento (ensaios de flexão em três pontos) na extensão do dano;
- A partir das técnicas de inspeção visual e ultrassons, investigar o dano provocado por solicitações mecânicas controladas de tração, em juntas adesivas de sobreposição simples, constituídas por substratos de fibra de vidro/epóxico;
- Avaliar a capacidade do equipamento de ultrassons *Prisma* da *Sonatest* para detetar defeitos, bem como, quantificá-los ao nível da sua extensão.

1.2. Organização da dissertação

Este trabalho encontra-se organizado em seis capítulos. No capítulo 1 faz-se um enquadramento e são apresentados os principais objetivos deste trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que se encontra dividida em duas secções, relacionando materiais compósitos e técnicas de ensaios não destrutivos. A descrição dos materiais compósitos é orientada para a matriz polimérica e fibras de reforço, sendo que, se faz uma apresentação das principais características das matérias-primas utilizadas no presente trabalho. Além disso, são também indicados os tipos de defeitos e danos mais comuns nestes materiais. Existem diversos métodos não destrutivos que podem ser usados para detetar e caracterizar defeitos em materiais compósitos. Na secção referente aos END são mencionadas as técnicas mais comuns. Por conseguinte, é dada especial ênfase à técnica de ultrassons, uma vez que, esta é objeto de estudo neste trabalho.

O capítulo 3 apresenta uma descrição das amostras, equipamentos e procedimentos experimentais usados ao longo do trabalho desenvolvido.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados relativos às amostras em estudo.

O capítulo 5 contempla as conclusões possíveis com este trabalho.

O capítulo 6 fornece algumas propostas de investigação a realizar no futuro.

Por fim, esta dissertação termina com a apresentação em anexos de informação extra, tanto experimental como teórica.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Materiais compósitos

Geralmente, os constituintes de um material compósito estão arrançados de modo que, uma ou mais fases descontínuas estejam distribuídas numa única fase contínua. A fase descontínua é designada de reforço, ao passo que, a fase contínua é denominada de matriz [1]. Na Figura 1 pode-se observar a representação esquemática dos constituintes de um material compósito.

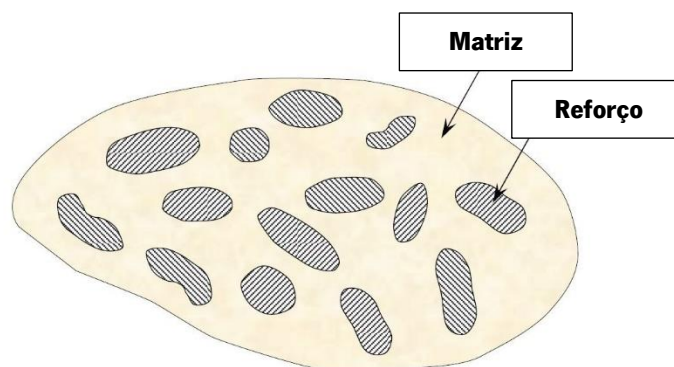


Figura 1: Material compósito (adaptado de [1]).

Quando o material compósito apresenta mais do que um reforço de naturezas distintas, este é chamado de compósito híbrido [1]. Tipicamente, o material de reforço é mais rígido e resistente que a matriz [7], embora com menores tenacidade e ductilidade. Além disso, este é responsável por suportar a maioria dos esforços a que o compósito for submetido [2]. As fibras (de vidro, carbono e aramida) representam o principal material de reforço utilizado em compósitos [8]. Por sua vez, a matriz é, geralmente, formada por um material com tenacidade e ductilidade maiores [2]. Esta confere ao material compósito uma forma estável [4] e assegura a transmissão e repartição dos esforços aplicados pelo reforço, assim como, a proteção deste de agressões externas como, por exemplo, a abrasão, absorção de água, ataques químicos, entre outros [9]. No geral as propriedades finais do material compósito são determinadas por:

- Propriedades da fibra;
- Propriedades da matriz;
- Razão fibra/resina (fração volúmica de fibras);
- Geometria e orientação das fibras [8].

2.2. Matrizes

Os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a natureza da matriz, que entra na sua constituição. Deste modo, tem-se:

- **Compósitos de matriz metálica** – resultam da combinação de uma matriz metálica com um material de reforço como fibras ou partículas de carboneto de silício;
- **Compósitos de matriz cerâmica** – estes materiais são constituídos por uma matriz cerâmica associada a um material de reforço, que pode ser fibras curtas de carboneto de silício, ou então, nitreto de boro;
- **Compósitos de matriz polimérica** – estes compósitos resultam da associação de uma matriz polimérica a um material de reforço constituído por fibras sintéticas ou naturais [8]. No presente trabalho apenas se utilizaram este tipo de compósitos.

Atualmente, os materiais mais utilizados como matriz são os polímeros, visto que, podem ser processados a temperaturas e pressões relativamente baixas. Os polímeros podem ser classificados como elastômeros, termoplásticos e termoendurecíveis [10]. Os materiais compósitos de matriz polimérica podem possuir uma matriz termoendurecível ou termoplástica.

Os termoplásticos são constituídos por macromoléculas de cadeia linear ou ramificada, que fundem quando aquecidos, podendo alterar a sua forma. Em princípio, este processo pode ser repetido sem perda significativa de propriedades [12]. Na Figura 2 está representada a estrutura física de um polímero termoplástico.

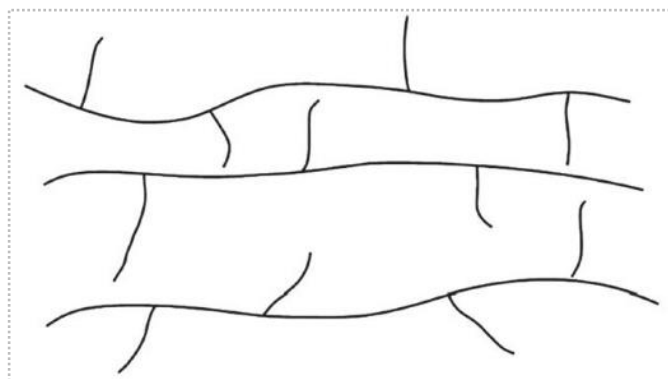


Figura 2: Representação esquemática de um polímero termoplástico (adaptado de [11]).

Os termoendurecíveis são polímeros altamente reticulados, de elevada rigidez, constituídos por uma rede molecular tridimensional. Devido à presença das reticulações, estes materiais não fundem

quando aquecidos, não se deformam e têm uma boa resistência térmica [12]. Na Figura 3 está representada a estrutura física de um polímero termoendurecível.

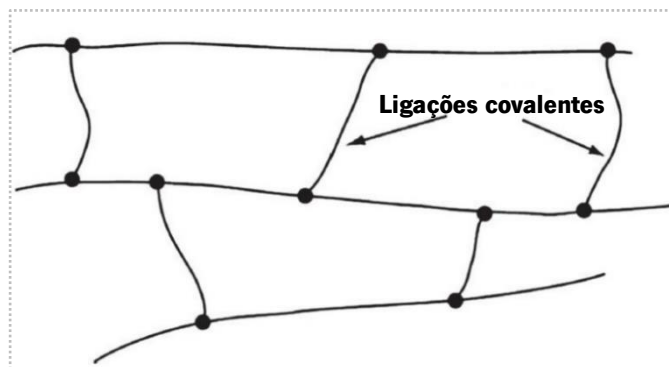


Figura 3: Representação esquemática de um polímero termoendurecível (adaptado de [11]).

As matrizes termoplásticas encontram-se no estado sólido à temperatura ambiente, sendo que, através da ação do calor e da pressão ocorre a impregnação do reforço [13, 14]. Estas matrizes apresentam uma maior dificuldade para impregnar o material de reforço do que as matrizes termoendurecíveis. Uma das principais razões para este acontecimento prende-se com o facto de os termoplásticos possuírem viscosidades mais elevadas, que os termoendurecíveis [4, 11, 13]. Isto limita a sua utilização, por exemplo, nos materiais compósitos de fibras longas, já que a dificuldade em impregnar reforços é diretamente proporcional à viscosidade [15]. Em contrapartida, os compósitos de matriz termoplástica apresentam algumas vantagens, relativamente aos de matriz termoendurecível, como uma maior resistência ao impacto, tenacidade e facilidade de reciclagem [4], pelo que, o interesse e procura por este tipo de matrizes tem vindo a crescer [7].

As matrizes termoendurecíveis apresentam-se, habitualmente, sob a forma de um líquido de baixa viscosidade à temperatura ambiente [11, 14]. Durante o processamento os termoendurecíveis passam por uma reação química, denominada de cura, onde ocorre a reticulação das suas cadeias moleculares, permitindo assim, a obtenção de um produto rígido e infusível [11, 13]. Geralmente, o processamento de uma resina termoendurecível resulta da mistura, em teores adequados, desta com as seguintes substâncias [4]:

- **Iniciador (catalisador)** – este é responsável pelo início da reação de cura do termoendurecível;
- **Acelerador/Inibidor** – o acelerador permite que o processo de cura seja mais rápido a uma dada temperatura constante, enquanto o inibidor atrasa o processo [11].

Antes da cura, as matrizes termoendurecíveis apresentam valores de viscosidade baixos, boa molhagem, adesão e combinação com fibras longas, pelo que, estas matrizes são mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos do que as matrizes termoplásticas. Após o processo de cura, as matrizes termoendurecíveis possuem uma reprocessabilidade difícil, o processamento não exige arrefecimento (solidificam durante a cura), pelo que, este decorre a baixa temperatura e pressão [15]. Existe uma grande diversidade de resinas termoendurecíveis disponíveis para o fabrico de materiais compósitos, sendo que, as mais empregues são os poliésteres insaturados, vinilésteres e as resinas de epóxico [13]. No presente trabalho, apenas se usou resina de epóxico.

2.2.1. Resinas de epóxico

As resinas de epóxico são, especialmente, indicadas para aplicações avançadas de elevada resistência mecânica [4], nomeadamente, em componentes estruturais dos setores aeroespacial e aeronáutico. Estas resinas são, geralmente, consideradas como tendo melhores propriedades do que as atribuídas a outras resinas termoendurecíveis como, por exemplo, os poliésteres insaturados [8]. Como vantagens principais podem citar-se:

- Excelentes propriedades mecânicas [8];
- Baixa contração durante a cura [16];
- Excelente poder de adesão aos reforços [1];
- Apresenta um bom comportamento a altas temperaturas [1];
- Boa resistência à corrosão [16].

Por outro lado, as suas principais desvantagens são:

- Processo de cura mais lento, relativamente ao das resinas de poliéster insaturado [17];
- Elevado custo [17];
- Elevado coeficiente de dilatação térmica [16];
- Sensibilidade à absorção de humidade, visto que, esta promove a alteração das suas propriedades físicas [16].

A Tabela 1 apresenta as principais propriedades das resinas de epóxico.

Tabela 1: Propriedades típicas das resinas de epóxico (adaptado de [11]).

Propriedades	Resinas de epóxico*
Massa volúmica [kg/m ³]	1200 - 1300
Módulo de elasticidade [GPa]	2,75 - 4,1
Resistência à tração [MPa]	55 - 130
Deformação à rotura [%]	1,5 - 8
Temperatura de transição vítrea T _g [°C]	150 - 260
Temperatura máxima de serviço [°C]	125

2.3. Reforços

Os materiais compósitos podem ser classificados quanto à forma do reforço que os constitui. Deste modo, estes materiais podem ser reforçados com partículas ou fibras [1]. No primeiro caso, os compósitos são constituídos por partículas de várias dimensões e formas, dispersas de modo aleatório na matriz [2, 10]. As partículas são sobretudo usadas como cargas, com o objetivo de reduzir o custo final do compósito. Quando os compósitos são reforçados com fibras, estas podem ser classificadas de contínuas (longas) ou descontínuas (curtas) [1]. O presente trabalho concentra-se no caso dos materiais compósitos reforçados com fibras longas. As fibras contínuas possuem uma maior relação comprimento/diâmetro, relativamente às fibras descontínuas, sendo mais eficientes no que toca à rigidez e resistência mecânica. Por sua vez, os materiais compósitos de fibras descontínuas são constituídos por pequenas fibras (*whiskers*) dispersas de forma aleatória ou orientada na matriz [2].

Presentemente, uma grande diversidade de materiais de reforço estão disponíveis para o uso em materiais compósitos, sendo os mais utilizados os do tipo fibroso [7]. No geral, as fibras podem apresentar as seguintes configurações:

- Mechas contínuas;
- Mantas;
- Tecidos.

* As propriedades das resinas de epóxico são apresentadas sob a forma de intervalos, visto que, estas dependem da estrutura química do polímero e das condições do processo de cura [11].

As mechas contínuas consistem num cordão de filamentos contínuos enrolado helicoidalmente em bobines [4]. Estas também podem ser denominadas de *rovings* (fibras de vidro), ou então de *tows* (fibras de carbono) [18].

As mantas consistem em fibras curtas ou longas agregadas, segundo direções aleatórias, sendo necessário a utilização de um ligante, de modo a conceder estabilidade [4].

Os tecidos são obtidos a partir do entrelaçamento de fibras segundo direções perpendiculares, pelo que, podem apresentar padrões distintos [4]. As diferenças nos padrões permitem auxiliar na identificação dos tecidos, através do padrão de repetição que se pode encontrar [7]. Posto isto, os tecidos podem ser classificados como unidirecionais, equilibrados (entrelaçados) e híbridos [4].

Um tecido é designado de unidirecional, quando as fibras se encontram dispostas paralelamente umas às outras, apresentando uma maior resistência na direção dos filamentos principais [19]. Na Figura 4 encontra-se ilustrado um exemplo de um tecido unidirecional.

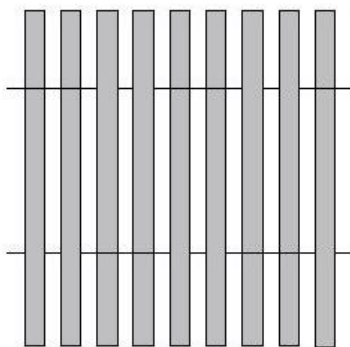


Figura 4: Tecido unidirecional (adaptado de [1]).

Um tecido equilibrado possui o mesmo número de fibras tanto na direção longitudinal como na direção transversal. De seguida, são ilustrados alguns estilos clássicos de tecidos entrelaçados como o tafetá (*plain*), sarja (*twill*) e cetim (*satín*). Deste modo, tem-se:

- **Tecido tafetá** – este é o tipo de tecido mais comum, em que cada feixe de fibras orientadas a 0° passa, alternadamente, por baixo e por cima de cada feixe de fibras orientadas a 90° [4]. Os tecidos tafetá apresentam uma boa resistência mecânica nas direções longitudinal e transversal [20]. Na Figura 5 pode-se observar um exemplo de um tecido tafetá.

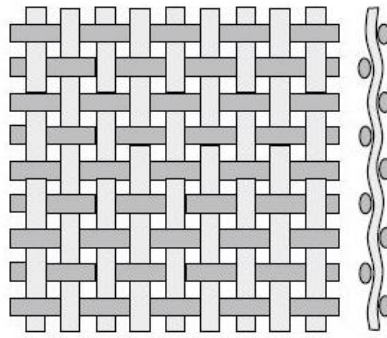


Figura 5: Tecido tafetá (adaptado de [1]).

- **Tecido sarja** – nesta configuração um ou mais feixes de fibras orientadas a 0° passam, alternadamente, por cima e por baixo de dois ou mais feixes de fibras orientadas a 90° de modo repetitivo, gerando um padrão diagonal. Os tecidos sarja apresentam melhores propriedades mecânicas, comparativamente aos tecidos tafetá [4, 20]. Na Figura 6 está representado um exemplo de um tecido sarja.

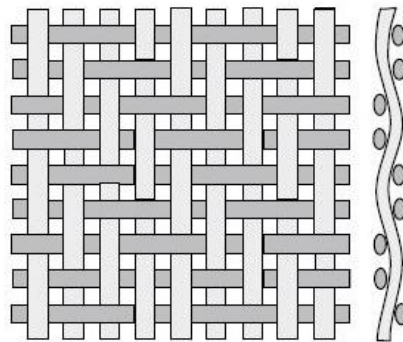


Figura 6: Tecido sarja (adaptado de [1]).

- **Tecido cetim** – os tecidos cetim são semelhantes aos tecidos sarja, porém, estes são alterados de modo a causar poucas interseções entre as fibras orientadas a 0° e as fibras a 90° . A configuração do tipo cetim apresenta melhores propriedades mecânicas, em relação ao tecido tafetá [4, 20]. Na Figura 7 encontra-se ilustrado um exemplo de um tecido cetim.

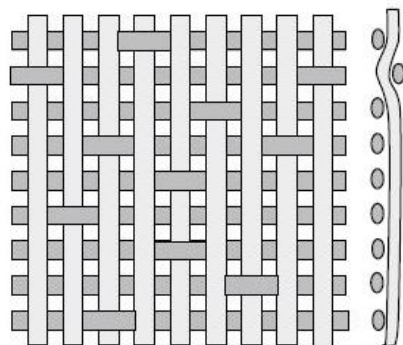


Figura 7: Tecido cetim (adaptado de [1]).

O material de reforço é, normalmente, responsável pelas propriedades mecânicas finais de um material compósito [8]. Quando se procede à sua seleção, as características que se pretendem são a baixa densidade, propriedades mecânicas elevadas, boa compatibilidade com as matrizes e o baixo custo [7]. As fibras mais usadas em compósitos de matriz polimérica são as fibras de vidro, carbono e de aramida [4]. No presente trabalho utilizaram-se as fibras de vidro e de carbono.

2.3.1. Fibras de vidro

As fibras de vidro são de longe o tipo de material de reforço mais empregue no fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica [10]. As razões para o seu uso são atribuídas à combinação de várias características destas fibras como, por exemplo, uma boa resistência à tração, excelente comportamento ao impacto e uma boa resistência a agentes químicos. Além disso, o seu custo é baixo, pois a sílica (SiO_2) é o composto químico mais utilizado na produção de fibras de vidro, devido à sua abundância natural [18]. Por outro lado, estas fibras possuem algumas desvantagens, como o facto de possuírem maior densidade, comparativamente às fibras de carbono, assim como, um menor módulo de elasticidade [8, 18]. As fibras de vidro podem ser classificadas de diferentes formas, de acordo com a sua composição química. Deste modo, tem-se:

- Fibras do tipo E;
- Fibras do tipo C;
- Fibras do tipo S [8].

As fibras do tipo E, ou também denominadas de “*electrical glass*” são as mais utilizadas em materiais compósitos, devido à boa relação entre o custo e propriedades mecânicas [14, 18]. Este tipo de fibra apresenta excelentes propriedades de isolamento elétrico, boa resistência à humidade e elevadas propriedades mecânicas [2]. Por sua vez, as fibras do tipo C são as que evidenciam melhor resistência à corrosão [8]. As fibras do tipo S, que também podem ser designadas de fibras do tipo R ou T, dependendo da origem dos fabricantes, possuem uma maior resistência à tração e módulo de elasticidade, comparativamente às fibras do tipo E. Contudo, estas possuem um custo elevado, sendo utilizadas na produção de componentes, onde são exigidos requisitos mecânicos elevados [1, 8]. A Tabela 2 apresenta as principais propriedades das fibras de vidro do tipo E e S.

Tabela 2: Propriedades típicas das fibras de vidro do tipo E e S (adaptado de [11]).

Propriedades	Fibras de vidro do tipo E	Fibras de vidro do tipo S
Massa volúmica [kg/m ³]	2540	2490
Módulo de elasticidade [GPa]	72,4	86,9
Resistência à tração [MPa]	3450	4300
Deformação à rotura [%]	4,8	5

2.3.2. Fibras de carbono

As fibras de carbono são, sobretudo, empregues em compósitos de elevado desempenho mecânico, em segmentos como a aeronáutica e aeroespacial, uma vez que, estas possuem um módulo de elasticidade muito elevado e uma baixa densidade [4, 5]. As fibras de carbono são produzidas a partir da pirólise de dois precursores principais: o Poliacrilonitrilo (PAN) e os resíduos da destilação do petróleo (*Pitch*). Presentemente, o precursor mais utilizado é o Poliacrilonitrilo [4, 8]. Segundo o critério da resistência mecânica, as fibras de carbono podem ser classificadas da seguinte forma:

- Resistência elevada (HS);
- Módulo intermédio (IM);
- Módulo elevado (HM);
- Módulo muito elevado (UHM) [4, 8].

As fibras de carbono apresentam uma elevada resistência à tração, compressão e à fadiga [8], e ainda, um coeficiente de dilatação térmico negativo na direção longitudinal [11]. Por outro lado, estas possuem alguns inconvenientes como, por exemplo, uma resistência ao impacto inferior, relativamente às fibras de vidro e de aramida [8], custo elevado e a possibilidade de sofrerem corrosão galvânica quando em contacto com metais [5]. A Tabela 3 apresenta as principais propriedades das fibras de carbono do tipo HS, IM e UHM.

Tabela 3: Propriedades típicas das fibras de carbono do tipo HS, IM e UHM (adaptado de [14]).

Propriedades	Fibras de carbono do tipo HS	Fibras de carbono do tipo IM	Fibras de carbono do tipo UHM
Massa volúmica [kg/m ³]	1800	1800	1900
Módulo de elasticidade [GPa]	228	276	441
Resistência à tração [MPa]	4137	5378	3447
Deformação à rotura [%]	1,6	1,8	0,5

2.4. Laminados

Os laminados em material compósito são criados através do empilhamento ordenado de camadas do mesmo ou de diferentes materiais de reforço, impregnados com resina [1, 21]. Para se conceber um laminado eficiente para uma dada aplicação, é necessário ter em consideração aspetos como, a orientação das fibras, o número de camadas e a sequência de empilhamento, de modo que este tenha as propriedades mecânicas desejadas. Podem-se produzir laminados com múltiplas configurações. Isto é, estes podem ser formados por tecidos unidireccionais, equilibrados, ou então, uma combinação de ambos, dependendo das especificações definidas pelos responsáveis do projeto estrutural [7].

A designação que caracteriza os laminados em material compósito inclui indicações sobre o número, orientação e ordem de empilhamento das camadas. Esta é efetuada da seguinte forma (ver Figura 8):

- Cada camada é denominada pelo número que representa o valor em graus entre a orientação da fibra e o eixo de referência x;
- Se as camadas apresentarem orientações distintas, estas são separadas pelo caractere /;
- Caso existam camadas consecutivas com a mesma orientação, elas são representadas por um número em índice;
- Quando as camadas apresentam a mesma orientação, mas com sinais opostos utiliza-se o caractere + ou –, dependendo do eixo de referência selecionado [1].

Designação: $[30^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$

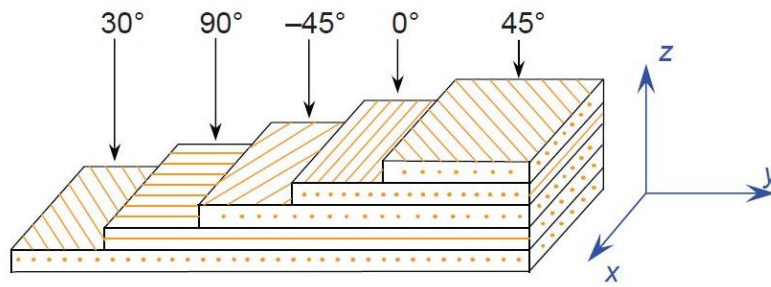


Figura 8: Exemplo de uma sequência de empilhamento e designação correspondente (adaptado de [1]).

2.5. Processos de fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica

2.5.1. Infusão de resina assistida a vácuo (VARI)

O processo de produção de materiais compósitos VARI (*Vacuum Assisted Resin Injection*) é uma variante da técnica de RTM (*Resin Transfer Molding*) [22]. Trata-se de um processo em que o material de reforço é impregnado, através da injeção de uma resina de baixa viscosidade no interior de um molde rígido, por ação de vácuo [18, 22]. O molde é selado por uma membrana flexível denominada de saco de vácuo [11]. A técnica VARI é indicada para produções limitadas, porém, esta permite o fabrico de estruturas de grandes dimensões e com um elevado grau de complexidade [7, 22]. Esta técnica de produção que está representada na Figura 9 consiste nas seguintes etapas:

- Colocação do material de reforço no interior do molde;
- O molde é selado com um saco de vácuo, que comprime o material de reforço contra o molde;
- Introdução da resina no interior do molde, por efeito do gradiente de pressão entre a entrada de resina à pressão de 1 atm e a saída de resina (bomba de vácuo à pressão de 0 atm). A resina flui ao longo do molde, permitindo a impregnação do material de reforço;
- Cura da resina;
- Abertura do molde e desmoldagem da peça [22].

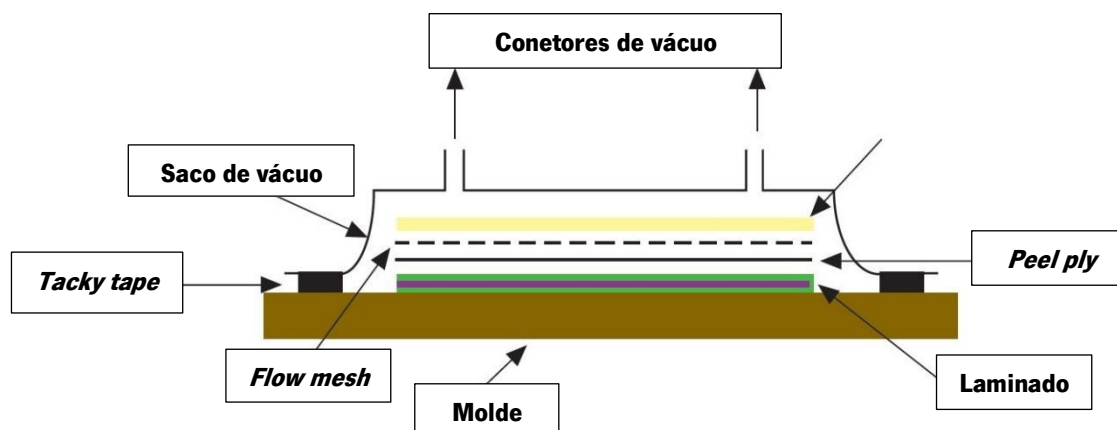


Figura 9: Ilustração do processo VARI (adaptado de [8]).

No processo VARI, o material de reforço é, normalmente, coberto com uma camada de tecido fino removível e uma rede de distribuição. A camada removível (*peel ply*) facilita a desmoldagem da peça quando esta está curada, ao passo que, a rede de distribuição (*flow mesh*) permite o espalhamento uniforme de resina pelo material de reforço [18, 23, 24].

A pressão de vácuo é efetuada em molde fechado com recurso a um saco de vácuo, sendo o ar retirado a partir de uma bomba de vácuo [7]. O vácuo proporciona o escoamento da resina através de canais de alimentação colocados de forma estratégica e, por sua vez, a introdução desta no interior do molde de modo a impregnar o material de reforço. Uma estratégia de colocação dos canais de entrada e saída de resina deverá ser definida previamente, visto que, esta influencia de modo significativo o tempo de enchimento do molde [22, 24, 25]. No final da infusão, o excesso de resina segue para um recipiente, designado de *resin trap*, o qual é colocado entre a peça final e a bomba de vácuo. Assim, é somente introduzida uma quantidade mínima de resina, permitindo uma diminuição de peso do compósito, bem como, um aumento da rigidez.

O principal obstáculo no planeamento do processo VARI é que consoante as dimensões e geometria do componente a produzir, torna-se necessário uma disposição dos canais de entrada e saída de resina distinta para cada geometria de peça. Com isto pretende-se uma distribuição completa da resina por toda a peça e, assim, evitar qualquer desfasamento na sua progressão ou a solidificação antes de o processo estar concluído [22, 23]. O processo VARI apresenta numerosas vantagens, relativamente a outras técnicas de produção. As suas principais vantagens são as seguintes:

- Melhora a saúde e segurança, pois o saco de vácuo não permite a libertação de voláteis para o meio ambiente, durante o processo de cura [8];
- Capacidade para fabricar estruturas complexas e peças ocas [24];

- Possibilidade de colocação de insertos no interior do molde [24];
- O uso de baixas pressões permite que os moldes não sejam de metal, resultando assim, numa redução de custos [14];
- Quantidades reduzidas de bolhas de ar [8].

No que concerne a desvantagens realce-se:

- Sensibilidade a fugas de ar [22];
- A qualidade superficial das peças não é tão boa, comparativamente a outras técnicas (p. ex. RTM), visto que, o lado da peça que está em contacto com o saco de vácuo apresenta uma qualidade superficial inferior, em relação ao outro lado da peça definido pelo molde [14];
- Facilidade na obtenção de peças com defeitos, isto é, quando a infusão é iniciada torna-se muito difícil corrigir qualquer erro [24];
- Este processo gera desperdícios, uma vez que, acessórios como mangueiras, *runners* e *peel ply* são utilizados apenas uma vez, sendo posteriormente descartados [22].

Através da técnica VARI é possível fabricar uma grande diversidade de componentes e estruturas para as mais variadíssimas áreas. A Tabela 4 apresenta algumas aplicações típicas desta técnica.

Tabela 4: Aplicações do processo VARI (adaptado de [22]).

Setor	Aplicações
Naval	Cascos, pavimentos, escotilhas de iates
Transportes	Painéis exteriores para automóveis
Aeroespacial	Lemes de pequenas aeronaves
Energia	Painéis solares e pás de turbinas eólicas
Militar	Cascos de veículos blindados e de navios militares

2.6. Defeitos e danos em materiais compósitos

Os materiais compósitos são suscetíveis à formação de vários defeitos, ao longo do seu tempo de vida, devido à sua natureza heterogénea e às técnicas de fabrico de múltiplas etapas [22]. Os defeitos podem ser gerados quer na fase de produção do compósito, quer durante o seu funcionamento em

serviço, sendo as razões para o seu aparecimento diversas [26, 27]. Quando uma anomalia física ocorre durante o processo de fabrico de um componente, geralmente, esta é classificada como defeito. Por outro lado, se a anomalia surgir em condições de serviço, esta é denominada de dano [17]. A presença de defeitos num componente em material compósito, afeta as suas propriedades mecânicas, uma vez que, limita a sua resistência à fadiga e, conseqüentemente, o seu tempo de serviço [28]. Deste modo, torna-se fundamental monitorizar a integridade dos componentes estruturais feitos com estes materiais, de forma a prevenir a ocorrência de danos catastróficos. Nesta secção é apresentada uma descrição geral, dos tipos de defeitos e danos mais comuns nos materiais compósitos.

2.6.1. Principais defeitos gerados durante a fase de produção

A fase de produção do compósito possui potencial para provocar uma grande diversidade de defeitos, independentemente do processo de fabrico utilizado [28, 29]. Alguns aspetos como a inexperiência das pessoas envolvidas no processo de produção, uma preparação inadequada e, ainda, um manuseamento inadequado das matérias-primas, podem contribuir para uma maior probabilidade de formação de defeitos [28]. Os principais defeitos que podem surgir durante o fabrico de componentes em material compósito são os vazios e porosidade, rugas e corpos estranhos (inclusões) [27].

Os vazios e a porosidade resultam de compostos voláteis libertados pela resina durante o processo de cura ou de ar que permanece “preso” entre as camadas de fibra [26, 30]. Os vazios caracterizam-se por ser somente uma bolha, ao passo que, a porosidade pode ser vista como vários vazios microscópicos distribuídos uniformemente. As principais causas para a formação de vazios e porosidade são as seguintes:

- Ar dissolvido no interior da resina;
- Produtos de reação resultantes do processo de cura;
- Volatilização de componentes de baixo peso molecular da resina ou de inclusões orgânicas, a temperaturas de cura elevadas [30].

Os vazios e a porosidade (ver Figura 10) podem atuar como pontos de concentração de tensões [31]. Além disso, eles afetam o desempenho mecânico do compósito, na medida em que, diminuem a sua resistência ao corte, compressão e flexão. Quando os vazios apresentam um tamanho considerável podem atuar como delaminações, diminuindo de forma significativa a resistência ao corte do compósito [30, 31]. Assim, os vazios e a porosidade promovem a fragilização do compósito, podendo posteriormente, induzir a formação de outros tipos de defeito [26]. Em geral, a porosidade ou a

concentração de vazios não deverá ultrapassar 1-2%, em compósitos de elevado desempenho mecânico [31].

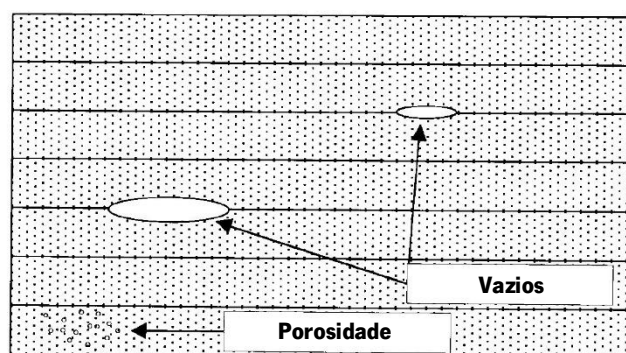


Figura 10: Vazios e porosidade (adaptado de [18]).

As rugas caracterizam-se pela ondulação de uma camada ou um grupo de camadas de reforço que compõem um laminado [31]. Durante o empilhamento ordenado das camadas de reforço é fundamental remover as rugas, quando as novas camadas são adicionadas, uma vez que, estas podem originar zonas de grande concentração de resina e o aparecimento de vazios [26]. A distorção das camadas de reforço, relativamente ao seu estado inicial pode ser provocada pela contração da resina durante a cura [31]. As rugas (ver Figura 11) geram zonas de concentração de tensões, afetando assim, as propriedades mecânicas do compósito, nomeadamente, a sua resistência à fadiga [28, 31].

Durante o empilhamento das camadas de reforço, corpos estranhos como poeiras, *peel ply*, entre outros, podem ficar “presos” entre as camadas. Em torno desses contaminantes podem desenvolver-se tensões e, conseqüentemente causar o aparecimento de outros defeitos. As inclusões (ver Figura 11) podem ser vistas como delaminações [26, 30].

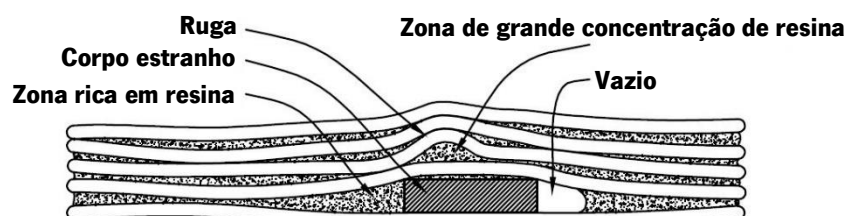


Figura 11: Representação esquemática de uma ruga, inclusão, bem como, de outros defeitos (adaptado de [26]).

2.6.2. Principais danos gerados em condições de serviço

Os principais danos que podem surgir num componente estrutural em material compósito, quando este se encontra em condições de serviço são os seguintes:

- Descolamento;
- Delaminação;
- Fissuração da matriz;
- Rotura de fibras.

Geralmente, estes danos estão intimamente ligados e resultam de solicitações de impacto, furação, fadiga ou sobrecarga [27, 28].

O descolamento, como o próprio nome indica, consiste na separação de componentes unidos através de juntas adesivas, ou então, no descolamento do núcleo das camadas de reforço exteriores, em estruturas do tipo sanduíche. Fundamentalmente, o descolamento pode ser considerado como uma delaminação entre estruturas coladas. Este tipo de defeito pode ser provocado por ação de solicitações de impacto, sobrecarga [31] e ainda por humidade retida [26]. Em termos de consequências para o compósito, este tipo de defeito causa a diminuição da sua rigidez e promove a alteração das suas características de amortecimento [26, 30].

De acordo com um estudo da companhia aérea *Boeing*, realizado por *Miller et al.* [5], as delaminações representam cerca de 60% dos danos encontrados durante a inspeção de componentes aeronáuticos [5]. A delaminação consiste na separação de camadas adjacentes do laminado, sendo a sua propagação confinada a um plano [32]. O risco de ocorrer delaminação aumenta, quando o compósito apresenta zonas de grande concentração de resina ou zonas sem resina [26]. Por outro lado, a delaminação também pode ser provocada por impacto (tipo de solicitação mais comum) ou sobrecarga e, normalmente, implica o aparecimento de fissuras na matriz e a rotura de fibras [27]. A delaminação tem um efeito muito prejudicial na resistência mecânica do compósito, na medida em que, provoca uma diminuição significativa da sua rigidez, assim como, da resistência à compressão o que poderá levar ao colapso do material [5, 30].

A fissuração da matriz consiste em fissuras que surgem no interior da matriz, podendo estas ser observadas ao longo da espessura do compósito. As fissuras atuam como pontos de concentração de tensões, pelo que, podem promover a formação de defeitos do tipo delaminação ou rotura de fibras [30]. As fissuras na matriz ocorrem, normalmente, de forma paralela às fibras e podem ser provocadas por

tensões de origem térmica ou mecânicas. As tensões de origem térmica resultam dos diferentes coeficientes de dilatação térmicos entre camadas adjacentes e das reações químicas exotérmicas. Já as tensões mecânicas podem ser induzidas por sobrecarga da matriz, ou então, pelo fenómeno de contração da resina durante o processo de cura [31]. As fissuras não afetam, significativamente, a resistência mecânica do compósito, no entanto, conduzem à formação de delaminações [6].

A rotura de fibras pode resultar de um manuseamento inadequado, imperfeições e de solicitações de impacto, tração e compressão [26, 30]. Em torno dos locais onde se encontram fibras partidas podem desenvolver-se tensões e, conseqüentemente conduzir à quebra de outras fibras [26]. Este tipo de dano diminui de forma significativa, a resistência à tração de laminados em material compósito [30].

2.6.2.1. Furação de materiais compósitos

A operação de furação trata-se de um dos processos de maquinagem mais utilizados em materiais compósitos, devido à necessidade de ligar peças em estruturas. Isto é, estabelecer uma ligação mecânica entre os diversos componentes por meio de parafusos, rebites, entre outros [4, 32]. A utilização deste processo de maquinagem em materiais compósitos deve merecer atenção pelos danos que pode provocar nas peças a ligar. Os materiais compósitos apresentam um conjunto de características, que tornam a operação de furação um processo complexo e delicado, podendo mesmo afetar a qualidade dos furos produzidos. Essas características são as seguintes:

- Natureza heterogénea;
- Anisotropia;
- Sensibilidade ao calor;
- Materiais de reforço abrasivos [33].

O processo de furação pode provocar diversos danos num componente em material compósito. O tipo de dano mais frequente e grave é a delaminação, pois pode conduzir a uma redução significativa da resistência mecânica na zona de ligação [32]. A operação de furação origina delaminação quer à entrada quer à saída do furo. À entrada do furo, a broca causa o arrancamento das camadas superiores, enquanto à saída esta atua como um punção e a força de avanço provoca a separação entre as camadas inferiores [4]. Outros tipos de defeito que podem resultar da furação são as fissuras interlaminares, descolamento fibra/matriz, e ainda, danos de origem térmica devido ao sobreaquecimento da matriz [4, 32]. É evidente a necessidade de um melhor conhecimento dos mecanismos que levam ao aparecimento destes tipos de dano, de modo a reduzi-los, ou até mesmo evitá-los [32].

2.6.2.2. Impacto em materiais compósitos

No segmento aeronáutico, muitos dos componentes estruturais metálicos existentes nas asas e fuselagens, começaram a ser substituídos de modo gradual por materiais compósitos, nomeadamente, pelos compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de carbono [6]. Estes componentes estão diversas vezes sujeitos a solicitações de impacto como, por exemplo, aves, queda de granizo, queda de ferramentas durante a fase de produção ou na manutenção de estruturas [3, 34]. Algumas destas solicitações provocam danos, que são facilmente localizados por inspeção visual, ao passo que, outras causam danos muito localizados e sem grande deformação plástica (*Barely Visible Impact Damage – BVID*), sendo mesmo necessário recorrer a métodos de inspeção não destrutiva, como é o caso dos ultrassons [6]. Os materiais compósitos são muito mais suscetíveis a danos por impacto que os metais, pois estes possuem uma fraca resistência na direção da espessura, assim como, uma baixa deformação limite [3, 6]. O dano causado por solicitações de impacto influencia o comportamento mecânico de uma estrutura, na medida em que reduz a sua capacidade de carga, podendo conduzir à rotura [3].

De acordo com *Gabriella Faur-Csukat* [35], a problemática do impacto em materiais compósitos pode ser caracterizada segundo baixa e alta velocidade [37]. Estas duas categorias são distintas em termos de comportamento do material e do dano que originam [4].

O impacto é considerado de baixa velocidade, quando o período de contacto do projétil é maior que o período de tempo do modo vibracional mais baixo do material, havendo uma resposta estrutural do componente e causando uma extensa área de dano [4, 35]. Este regime de impacto é, normalmente, aceite como um evento quase-estático, em que as velocidades podem variar entre 1 m/s e 100 m/s, dependendo da rigidez do projétil [19].

No regime de impacto de alta velocidade, o tempo de contacto do projétil é muito baixo, sendo menor que o período de tempo do modo vibracional mais baixo da estrutura. A resposta ao impacto é independente das condições de fixação e de carácter localizado, podendo existir ou não perfuração [4, 35]. As velocidades envolvidas neste tipo de impacto são superiores a 1 km/s [19].

O dano causado pelo impacto num componente em compósito depende de fatores como as propriedades e configuração do material de reforço, número de camadas de reforço e a sua sequência de empilhamento, propriedades da matriz, geometria e velocidade do impactor [35].

É de extrema importância o estudo do comportamento ao impacto de baixa velocidade dos materiais compósitos, pois este regime de impacto é perigoso por duas razões. A primeira razão deve-se

ao facto de este tipo de solicitação causar zonas de dano extensas, com a ocorrência de delaminações entre camadas de orientações distintas e fissuração da matriz. A segunda razão relaciona-se com a ausência de indentação ou fissuração superficial, pelo que, a deteção do dano é impercetível numa inspeção visual. Dos diversos tipos de dano que podem resultar do regime de impacto de baixa velocidade, o mais crítico é a delaminação, pois afeta a resistência mecânica de um componente estrutural, quando submetido à ação de solicitações como tração, flexão, compressão e fadiga. No entanto, o tipo de solicitação que sofre uma diminuição drástica é a resistência à compressão, que pode diminuir até 60% do seu valor inicial [3, 36]. Em laminados pouco espessos, o dano característico de impacto de baixa velocidade, consiste numa série de delaminações que formam uma região de dano de formato cónico (ver Figura 12), verificando-se um crescimento destas ao longo da espessura, à medida que a distância à superfície solicitada aumenta [4, 31, 34]. Para laminados mais espessos, constata-se que as solicitações de impacto de baixa velocidade causam fissuras na matriz e delaminações, cuja distribuição do dano ao longo da espessura é maior a meio da espessura [4].



Figura 12: Dano de impacto de baixa velocidade (adaptado de [30]).

No que concerne ao regime de impacto de alta velocidade, o dano provocado é facilmente localizado por inspeção visual, uma vez que, ocorre penetração originada pela rotura da matriz e das fibras (ver Figura 13) [4, 6].

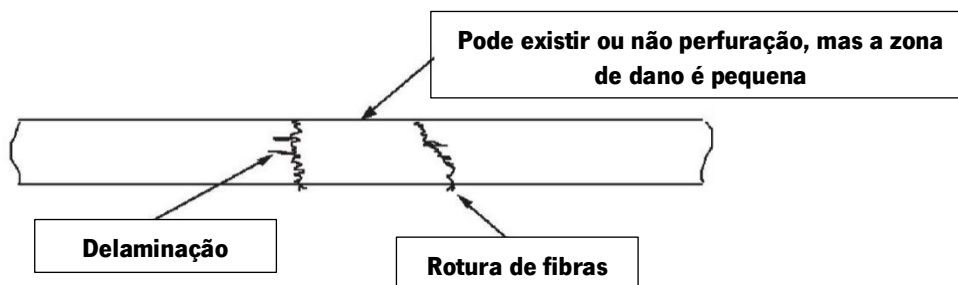


Figura 13: Dano de impacto de alta velocidade (adaptado de [30]).

2.7. Ligações adesivas entre materiais compósitos

Face ao aumento do uso de materiais compósitos em aplicações estruturais, bem como, a limitações nos processos de fabrico e à complexidade das estruturas, frequentemente é necessário recorrer ao estabelecimento de ligações entre diferentes componentes [4, 10]. Estas ligações, também denominadas de juntas, são efetivamente uma necessidade de projeto e podem ser estabelecidas entre dois componentes de material compósito, ou então, entre um componente metálico e um compósito [4, 11].

Para uma ligação ser eficiente, é de extrema importância que ocorra a distribuição de carga e tensões entre os dois componentes, de modo a preservar a sua integridade estrutural, quando esta for submetida à ação de solicitações, bem como, a condições ambientais adversas [4].

Um dos principais processos de ligação em materiais compósitos é o de ligação com adesivos [4], sendo este alvo de estudo no presente trabalho. Este tipo de ligação, normalmente designada por colagem [37], consiste no uso de um adesivo (material polimérico), de forma a permitir a união de dois substratos [4]. O processo de ligação com adesivos reúne um conjunto significativo de vantagens, comparativamente a outros métodos de ligação, tais como:

- Permite a transmissão de carga sobre uma superfície maior, conduzindo a uma redução da concentração de tensões [4, 11];
- Eliminação da concentração de tensões, visto que, não há necessidade de se realizarem furos para a colocação de parafusos ou rebites [11];
- O caráter viscoelástico do adesivo proporciona o amortecimento de vibrações [4];
- A ligação é mais leve, pois não são utilizados elementos mecânicos de reforço que aumentam o peso da estrutura [11].

Por outro lado, as ligações adesivas apresentam algumas limitações, tais como:

- Necessidade de realizar a limpeza e tratamento superficial dos substratos a colar [4];
- Resistência limitada sob condições extremas como a temperatura e humidade [4];
- Tipo de ligação com um caráter definitivo, pelo que, a desmontagem só é possível através da danificação ou destruição dos componentes [11].

Existe uma grande diversidade de adesivos, assim como, critérios de classificação. Um desses critérios é o que se baseia no desempenho apresentado pelo adesivo, podendo este ser classificado

como estrutural e não estrutural. O adesivo estrutural é definido como um material capaz de suportar a transferência de esforços de grandeza substancial [37]. Como exemplos deste tipo de adesivos podem citar-se os epóxidos, acrílicos e poliuretanos [11]. O adesivo não estrutural é indicado para juntas onde os esforços aplicados são relativamente baixos [4]. Os principais tipos de juntas adesivas são apresentados na Figura 14.

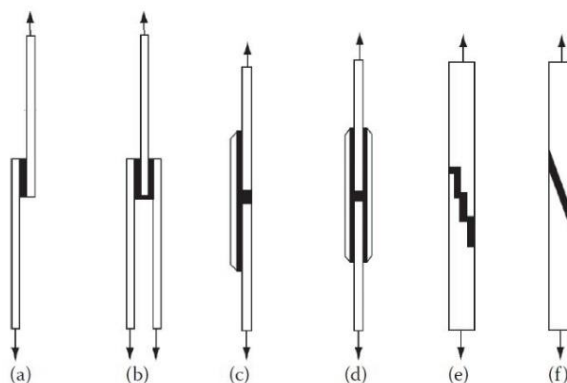


Figura 14: Tipos de juntas adesivas mais comuns - (a) sobreposição simples; (b) sobreposição dupla; (c) reforço simples; (d) reforço duplo; (e) degrau; (f) rampa (adaptado de [11]).

É essencial uma preparação adequada das superfícies dos substratos a ligar, de modo a garantir um bom desempenho da junta. Geralmente, a preparação das superfícies decorre em três etapas:

- Limpeza da superfície do substrato através de solventes apropriados;
- Abrasão da superfície do substrato de forma a aumentar a rugosidade e a área de contacto entre o adesivo e o substrato;
- Tratamento químico com a finalidade de aumentar a energia de superfície [4, 11].

Em geral, os modos de rotura mais comuns em juntas adesivas de materiais compósitos (ver Figura 15) são os seguintes:

- Rotura adesiva;
- Rotura coesiva;
- Rotura mista.

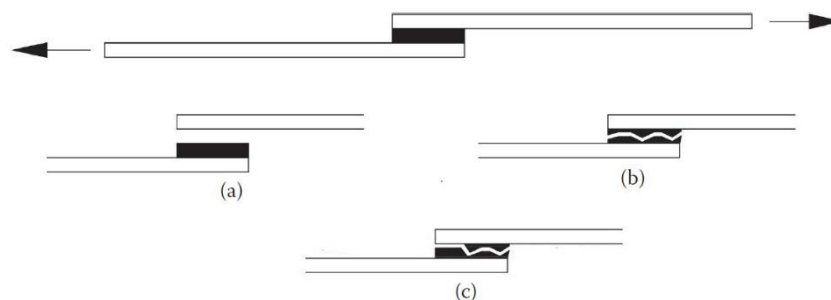


Figura 15: Modos de ruptura em juntas adesivas - (a) ruptura adesiva; (b) ruptura coesiva; (c) ruptura mista (adaptado de [11]).

O modo de ruptura adesiva acontece na interface entre o adesivo e um dos substratos, verificando-se a superfície de ruptura de um dos substratos coberta de adesivo, enquanto a superfície do outro substrato se encontra sem resíduos de adesivo. A ruptura coesiva no interior do adesivo está relacionada com o facto da resistência mecânica do próprio adesivo ser mais fraca do que a união entre o substrato e o adesivo. Por fim, o modo de ruptura mista resulta da combinação da ruptura adesiva com a ruptura coesiva [11, 37]. A qualidade e resistência das juntas adesivas depende do número e dos tipos de defeito presentes na zona de colagem. Os defeitos são gerados durante a operação de colagem, sendo alguns muito difíceis de detetar através de métodos de inspeção não destrutiva como, por exemplo, ultrassons. Os tipos de defeitos mais comuns nas juntas adesivas são os vazios e porosidade, descolamento e fissuras no adesivo ou na interface adesivo/substrato [11].

2.8. Ensaios não destrutivos aplicados a materiais compósitos

Nos materiais compósitos translúcidos como, por exemplo, os de matriz termoendurecível de epóxico reforçados com fibra de vidro, é possível visualizar o dano interno, no entanto, nos compósitos de matriz de epóxico reforçados com fibra de carbono, é necessário o recurso a métodos de controlo não destrutivo [3]. As técnicas de inspeção não destrutiva, também conhecidas como “*NDT – Non Destructive Testing*” ou “*NDE – Non Destructive Evaluation*” [38], permitem realizar uma avaliação estrutural de um material, sem afetar a sua integridade física [39]. A aplicação cada vez mais massiva de materiais compósitos em componentes, nas mais diversas áreas de atividade, associada à necessidade de manter a sua integridade, levou a uma crescente adoção de métodos de monitorização não destrutivos neste tipo de materiais [7, 40]. Contudo, a inspeção de materiais compósitos apresenta dificuldades em termos de deteção de defeitos e de caracterização das propriedades dos materiais, que geralmente não se verificam na inspeção dos materiais convencionais como os metais e cerâmicos. Isto deve-se, naturalmente, à sua natureza heterogénea e anisotrópica, associada a uma elevada complexidade geométrica deste tipo de componentes [5, 22]. Por essa razão, torna-se necessário uma

maior investigação e empenho no desenvolvimento de tecnologias com vista às inspeções não destrutivas, levando a verificações logo na fase de produção, assim como, da integridade estrutural dos componentes durante o seu tempo de vida [5, 7].

Existe uma grande diversidade de END, disponíveis para inspecionar componentes feitos com materiais compósitos, sendo os mais utilizados apresentados de seguida:

- Inspeção Visual;
- Termografia;
- Radiografia;
- Correntes Induzidas;
- Emissão Acústica;
- *Shearografia*;
- Ultrassons [39].

2.8.1. Inspeção visual

A inspeção visual é o tipo de inspeção mais comum, no que diz respeito aos materiais compósitos [31]. Este método de controlo não destrutivo é a primeira abordagem numa inspeção a qualquer tipo de componente estrutural em material compósito. A inspeção visual consiste em observar a olho nu, a superfície do componente a controlar, com o objetivo de detetar a presença de defeitos [18, 41]. Uma visualização cuidadosa da peça pode revelar a existência de defeitos que, por vezes, conduzem a uma redução das suas capacidades mecânicas [41]. Alguns tipos de defeitos como, por exemplo, bolhas, porosidade, rugas, inclusões, indentação superficial e descoloração, podem ser detetados através de uma avaliação visual [17]. No entanto, este método apresenta uma limitação importante, que é o facto de não ser possível analisar a integridade da estrutura interna do componente [18]. Por este motivo, tipos de dano como delaminação, fissuração da matriz, rotura de fibras e descolamento, não são passíveis de serem detetados por inspeção visual, pois constituem danos internos não visíveis havendo, assim, a necessidade do recurso a técnicas específicas de análise [17]. Frequentemente, a inspeção visual é complementada com outros métodos de controlo, de modo a permitir uma inspeção muito mais profunda e eficaz de um dado componente [41].

Para cada tipo de defeito são definidos critérios de aceitação ou rejeição, de modo a permitir uma análise objetiva e, se possível independente do operador [42]. Durante uma avaliação visual, podem ser utilizados dispositivos auxiliares, com vista a uma observação de maior detalhe de um determinado

defeito, bem como, inspecionar áreas que não são facilmente acessíveis [17, 41]. Esses auxílios óticos podem ser borescópios, microscópios, sistemas de iluminação e equipamentos de vídeo digital [14, 31, 41]. As principais vantagens e desvantagens da inspeção visual são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Vantagens e desvantagens da inspeção visual (adaptado de [41]).

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo operacional	Requer uma técnica apurada
Rapidez na detecção de defeitos	Subjetividade
Não é necessário o uso de equipamentos sofisticados	O dano resultante de impactos de baixa energia não é facilmente detetável

2.9. Ultrassons

2.9.1. Introdução

Os materiais compósitos caracterizam-se por serem acusticamente anisotrópicos [5] e muito mais suscetíveis a danos resultantes de solicitações de impacto que os metais [6]. Os defeitos mais comuns nesta classe de materiais são a rotura de fibras, inclusões, fissuração da matriz e delaminação. Estes defeitos causam alterações na atenuação acústica e na velocidade das ondas sonoras. Por este motivo, um dos métodos não destrutivos mais empregues na inspeção de materiais compósitos de matriz polimérica é o método de ultrassons [5].

O ultrassom é um som cuja sua frequência não é captável pelo ouvido humano, que tem como limite superior audível os 20 kHz [29]. A técnica de ultrassons baseia-se na transmissão de ondas acústicas de elevada frequência e na posterior receção das mesmas, sendo um defeito detetado quando este causa a reflexão das ondas sonoras [6, 42]. O feixe refletido é detetado e analisado, de modo a determinar a localização, profundidade e dimensões dos defeitos [43]. A elevada atenuação acústica presente nos materiais compósitos, leva à aplicação de frequências entre 1 MHz e 5 MHz na sua inspeção [6, 18, 41].

2.9.2. Princípios básicos dos ultrassons

2.9.2.1. Modos de propagação das ondas sonoras

O som é uma onda mecânica, pelo que, necessita de um meio físico para se propagar [29]. A sua propagação resulta da vibração dos átomos constituintes do material em torno das suas posições de

equilíbrio. Num meio físico sólido, as ondas sonoras podem se propagar sobre a forma de ondas longitudinais (compressão), transversais, superficiais (*Rayleigh*) e de chapa (*Lamb*), sendo os dois primeiros modos os mais comuns na inspeção por ultrassons. Cada onda possui as suas próprias características e velocidade [43]. A Tabela 6 apresenta uma descrição sobre o modo como vibram as partículas materiais em cada tipo de onda.

Tabela 6: Modo de vibração das partículas materiais nas ondas longitudinais, transversais, *Rayleigh* e *Lamb* (adaptado de [43]).

Tipo de onda	Vibração das partículas
Longitudinal	Paralela à direção de propagação das ondas
Transversal	Perpendicular à direção de propagação das ondas
<i>Rayleigh</i>	Órbita elíptica restrita à superfície
<i>Lamb</i>	Componente perpendicular à superfície

As ondas sonoras podem ser caracterizadas da seguinte forma:

- **Comprimento de onda** – distância horizontal mínima, entre dois pontos idênticos numa onda;
- **Frequência** – número de oscilações de uma partícula por unidade de tempo;
- **Velocidade de propagação** – distância percorrida pela onda sonora por unidade de tempo [44].

A velocidade de propagação está diretamente relacionada com o comprimento de onda e a frequência pela seguinte expressão:

$$V = f\lambda \quad (1)$$

Onde:

- V representa a velocidade de propagação em (m/s);
- f corresponde à frequência em (Hz);
- λ é o comprimento de onda em (m).

Existe uma relação entre o comprimento de onda e o tamanho do defeito a ser detetado. Em geral, o menor diâmetro de um defeito a ser detetado no componente deve ser na ordem de $\lambda/2$ [43].

2.9.2.2. Propriedades dos materiais que afetam a velocidade do som

A velocidade de propagação das ondas sonoras difere de material para material. Isso acontece, porque a velocidade é função da massa volúmica e das propriedades elásticas do material (por exemplo, o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson*), segundo a seguinte expressão:

$$V = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}} \quad (2)$$

Em que:

- V corresponde à velocidade de propagação do som em (m/s);
- C_{ij} é a constante elástica em (N/m²), numa dada direção (representada pelo índice i e j);
- ρ representa a massa volúmica em (kg/m³).

A expressão (2) pode assumir várias formas, consoante o tipo de onda e constantes elásticas utilizadas. Nos materiais isotrópicos, as constantes elásticas são iguais em todas as direções, ao passo que, nos materiais anisotrópicos estas diferem em cada direção. No caso das ondas longitudinais, a sua velocidade de propagação num material sólido é dada pela seguinte expressão:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3)$$

Onde:

- V_L representa a velocidade de propagação das ondas longitudinais em (m/s);
- E é o módulo de elasticidade do material em (Pa);
- ν corresponde ao coeficiente de *Poisson*.

Em relação às ondas transversais, a sua velocidade de propagação é dada pela expressão (4):

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (4)$$

Em que:

- V_T representa a velocidade de propagação das ondas transversais em (m/s) [43].

Em suma, a velocidade de propagação das ondas sonoras depende da massa volúmica e da rigidez do material, sendo a velocidade de propagação das ondas longitudinais, aproximadamente, duas

vezes maior que a velocidade de propagação das ondas transversais. Nos laminados em material compósito, a rigidez altera de uma direção para a outra, dependendo da orientação da fibra. Assim, a velocidade das ondas sonoras neste tipo de materiais é diferente em direções distintas [27].

2.9.2.3. Atenuação acústica

Quando o som se propaga num dado meio físico, a sua intensidade diminui com a distância. Na prática a amplitude das ondas sonoras nos materiais diminui devido aos fenómenos de dispersão e absorção. O fenómeno de absorção consiste na conversão da energia sonora noutras formas de energia, ao passo que, o fenómeno de dispersão trata-se da reflexão do som em direções distintas, relativamente à sua direção original de propagação. A associação destes dois fenómenos resulta num efeito denominado de atenuação, que é geralmente expressa em decibel (dB) [43].

Uma das dificuldades da inspeção por ultrassons de materiais compósitos é a elevada atenuação acústica, resultante do fenómeno de absorção provocado pela matriz e do fenómeno de dispersão induzido pelas fibras de reforço [45]. Por exemplo, em laminados de matriz de epóxico reforçados com fibra de carbono, a atenuação aumenta de 10 dB/cm a uma frequência de 1 MHz, para 30 dB/cm a 5 MHz [27]. Por outro lado, a inspeção por ultrassons neste tipo de materiais, também é condicionada pela espessura, pois quanto maior for esta, maior será a atenuação. Isto deve-se à diminuição da capacidade dos ultrassons para se deslocarem, com o aumento da distância de propagação [46]. Contudo, a atenuação pode ser diminuída, através do aumento do ganho aplicado ao sinal que gera a onda sonora [44].

2.9.2.4. Influência da interface na propagação das ondas sonoras

Quando as ondas sonoras atravessam uma interface entre dois materiais distintos, parte do som sofre reflexão, ao passo que, a outra parte é transmitida através da interface [27, 29]. No caso de um material compósito, a matriz e as fibras de reforço interagem de forma distinta com os ultrassons. Isto é, as fibras refletem as ondas sonoras, enquanto a matriz tende a absorvê-las [5]. Por outro lado, quando os ultrassons se propagam ao longo da espessura do material e encontram na sua trajetória um defeito, ocorre reflexão das ondas sonoras na interface compósito/defeito e a transmissão destas para o lado oposto do defeito [46].

A quantidade de energia sonora refletida depende de fatores como o ângulo de incidência das ondas acústicas, velocidade de propagação do som, e ainda, da massa volúmica do material. Os

coeficientes de reflexão (R) e de transmissão (T) do som podem ser determinados da seguinte forma [27]:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (5)$$

$$T = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (6)$$

Onde:

- Z_1 e Z_2 correspondem às impedâncias acústicas dos materiais 1 e 2, respetivamente [22].

A impedância acústica (Z) de um material consiste na resistência que este opõe à passagem do som [47], sendo esta igual ao produto entre a massa volúmica do material e a velocidade de propagação das ondas sonoras. Deste modo, tem-se:

$$Z = \rho V \quad (7)$$

Em que:

- ρ representa a massa volúmica em (kg/m³);
- V corresponde à velocidade de propagação do som em (m/s) [43].

Sempre que exista um defeito no material, e por conseguinte a sua impedância acústica seja distinta da do meio envolvente (matriz/fibra), ocorre reflexão das ondas sonoras [27, 29]. Através do método de ultrassons é possível detetar alguns dos defeitos mais comuns em compósitos como, por exemplo, a delaminação, inclusões e fissuração da matriz. A delaminação e a fissuração da matriz representam interfaces de ar, pelo que, originam a reflexão das ondas sonoras verificando-se, praticamente, a inexistência de transmissão do som. Um corpo estranho apenas será detetado, se a sua impedância acústica for consideravelmente diferente do material compósito [22]. Existem alguns tipos de inclusões que aderem à matriz e apresentam propriedades acústicas semelhantes ao compósito, pelo que, a sua deteção através da técnica de ultrassons é extremamente difícil.

2.9.3. Equipamento de ultrassons

Para inspecionar por ultrassons um material é necessário produzir neste, ondas sonoras de elevada frequência. Isto só é possível utilizando um dispositivo, que transforme impulsos elétricos em vibrações mecânicas e vice-versa. Esta conversão é efetuada por um cristal piezoelétrico existente na sonda, sendo este também denominado de elemento. Quando o cristal piezoelétrico da sonda é excitado

por um impulso elétrico, este emite uma vibração mecânica, a qual é transmitida ao material a avaliar. As ondas de ultrassom ao serem refletidas tanto por eventuais defeitos como pela superfície frontal e posterior do material regressam à sonda, onde ocorre a transformação de vibrações mecânicas em impulsos elétricos. Através da análise desses impulsos, é possível detetar eventuais defeitos no componente que está a ser analisado. [6, 43]. As sondas podem conter um ou diversos cristais piezoelétricos, sendo neste último caso denominadas de sondas *Phased Array* [31]. O equipamento de ultrassons é constituído, essencialmente, pelos seguintes componentes:

- Gerador de impulsos;
- Base de tempo;
- Transmissor;
- Recetor;
- Sonda;
- Sistema de visualização.

O gerador de impulsos como o próprio nome indica, é responsável por gerar impulsos elétricos em intervalos de tempo regulares, que vão excitar tanto o transmissor como a base de tempo. A base de tempo permite o aparecimento do eco inicial e da linha de base de tempos no ecrã de visualização. O transmissor possibilita a emissão dos impulsos elétricos ao cristal piezoelétrico da sonda, enquanto o recetor tem como função amplificar, filtrar e retificar esses mesmos impulsos. O sistema de visualização caracteriza-se por ser um monitor, em que os sinais de ultrassom recebidos são analisados, de modo a definir a presença e a localização de defeitos [42, 43]. Existem dois parâmetros que são utilizados com o intuito de caracterizar a capacidade de uma sonda para detetar defeitos: a sensibilidade e a resolução. A sensibilidade define-se como a capacidade da sonda para detetar defeitos de pequenas dimensões, e verifica-se que esta é tanto maior quanto maior for a frequência. Por outro lado, a resolução baseia-se na capacidade do dispositivo para detetar defeitos próximos uns dos outros. Geralmente, a resolução também é maior quanto maior for a frequência, no entanto, a aptidão para detetar defeitos a maiores profundidades diminui [18, 43]. No que concerne à detetabilidade dos defeitos, sondas de frequências baixas possuem uma maior penetração sonora e menor atenuação, mas também menor detetabilidade, ao passo que, sondas de frequências altas conduzem, simultaneamente, a uma maior atenuação e detetabilidade [6, 43].

2.9.4. Métodos de inspeção por ultrassons

Os dois métodos de inspeção por ultrassons, mais aplicados na detecção do dano em materiais compósitos de matriz polimérica são os seguintes:

- Método de reflexão (*Pulse echo*);
- Método de transmissão (*Through transmission*) [11].

2.9.4.1. Método de reflexão

No método de reflexão, a mesma sonda é responsável quer por emitir as ondas sonoras quer pela posterior receção das mesmas. Assim, este método é bastante útil nos casos em que a inspeção apenas poderá ser realizada num dos lados do componente [17, 41]. Quando o ultrassom sai da sonda “viaja” ao longo da espessura do material, sendo refletido, no caso da inspeção de compósitos, pelas zonas de transição entre materiais com propriedades distintas, assim como, por eventuais defeitos. As ondas sonoras refletidas regressam à sonda (também denominadas de ecos) sendo detetadas, e informações como a localização e o tamanho do defeito são determinadas através do tempo total de percurso e da amplitude. No lado direito da Figura 16 é possível observar uma representação *A-Scan* comum, obtida a partir deste método. Este tipo de representação consiste numa série de picos, cuja posição ao longo do eixo horizontal (eixo x) pode ser calibrada, em relação à espessura do material. O primeiro e o último eco representam a reflexão das ondas de ultrassom pela superfície frontal e oposta do componente a controlar, respetivamente. A presença de um defeito é assinalada pelo aparecimento de um pico entre o eco inicial e o eco relativo à superfície do fundo do material [41].

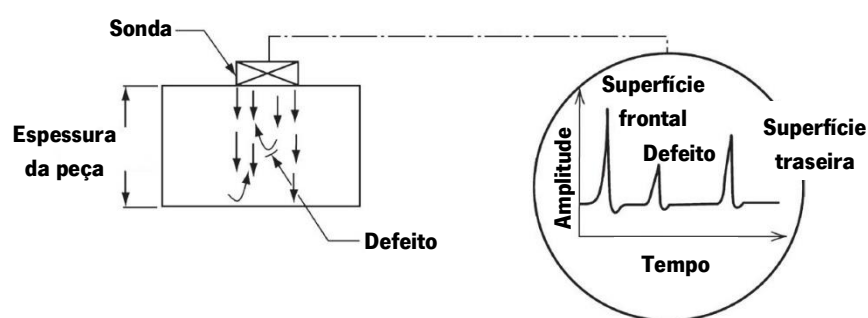


Figura 16: Método de reflexão (adaptado de [11]).

2.9.4.2. Método de transmissão

O método de transmissão (ver Figura 17) baseia-se no uso simultâneo de duas sondas, em que uma delas permite a emissão do sinal de ultrassom, enquanto a outra possibilita a posterior receção do mesmo. As duas sondas são colocadas em faces opostas do componente a inspecionar e têm de estar

perfeitamente alinhadas [41]. Este método é baseado na atenuação do sinal, isto é, diminuição da quantidade de energia sonora recebida, provocada pela existência de defeito no material como porosidade ou delaminação [17]. Esta técnica apresenta algumas limitações, como o facto de ser necessário acesso pelos dois lados da peça a analisar, e ainda, não indicar a profundidade dos defeitos [41].

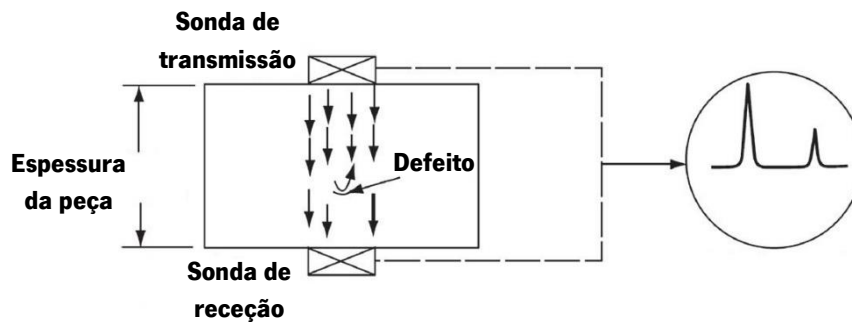


Figura 17: Método de transmissão (adaptado de [11]).

2.9.5. Tipos de sondas

Existe uma enorme diversidade de sondas disponíveis para inspeção de componentes, no entanto, estas podem ser classificadas em dois grandes grupos:

- Sondas de contacto;
- Sondas de imersão [43].

2.9.5.1. Sondas de contacto

As sondas de contacto são manipuladas de forma manual, havendo contacto direto entre a sonda e o componente a inspecionar [43]. O ar não é o meio mais adequado para transmitir o sinal de ultrassom para um meio físico sólido, uma vez que, a diferença de impedâncias acústicas entre estes dois é muito significativa [18]. Assim, é de extrema importância o uso de um fluido acoplante, para que se consiga uma boa transmissão das ondas sonoras para o material [41]. Como acoplante, pode-se utilizar água, óleos [43], glicerina [18], sendo este espalhado nas superfícies do componente e sobre o qual se encontra uma sonda sujeita a uma pressão moderada [41].

2.9.5.2. Sondas de imersão

As sondas de imersão são, normalmente, integradas em sistemas automatizados de inspeção constituídos por tanques que comportam água e os componentes a serem inspecionados. Neste caso, a sonda e o componente a avaliar são introduzidos no interior de um tanque, ficando totalmente imersos.

Neste tipo de inspeção não existe contacto direto entre a sonda e o componente, mas o acoplamento mantém-se consistente durante toda a inspeção. As sondas de imersão são construídas de modo a maximizar a transmissão de ultrassons dentro de água, com recurso a lentes acústicas [6, 43].

2.9.6. Tipos de representação dos dados adquiridos durante a inspeção

Os equipamentos de ultrassons fornecem os dados de inspeção sob diversas formas, sendo as mais comuns o *A-Scan*, *B-Scan* e *C-Scan*. Cada uma destas representações contém tipos de informação distintos, pelo que, a sua análise e interpretação também é diferente [45].

2.9.6.1. Representação *A-Scan*

A representação *A-Scan* oferece a indicação da quantidade de energia ultrassónica refletida em função do tempo. Este tipo de visualização é, basicamente, um gráfico (ver Figura 18) em que o eixo vertical (eixo y) corresponde à amplitude dos sinais de eco, enquanto o tempo de percurso encontra-se representado no eixo horizontal (eixo x). Através da vista *A-Scan* é possível determinar as dimensões relativas de um defeito, comparando a amplitude do seu eco com a de um refletor conhecido. Por outro lado, partindo da análise da posição do sinal no eixo do tempo (eixo x), é também possível achar a profundidade do defeito [45].

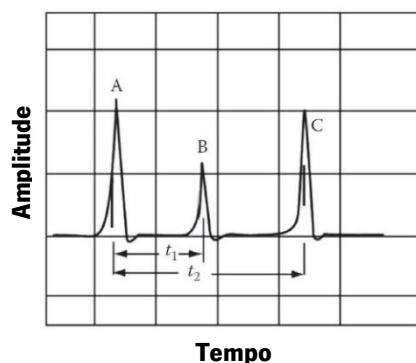


Figura 18: Representação *A-Scan* - (A) e (C) Ecos relativos à reflexão das ondas de ultrassom pela superfície e parede de fundo do componente, respetivamente; (B) Eco relativo a um defeito (adaptado de [11]).

2.9.6.2. Representação *B-Scan*

A representação *B-Scan* (ver Figura 19) fornece uma vista da secção transversal do componente em inspeção, após a sonda ter efetuado um varrimento ao longo da sua superfície. Este tipo de representação mostra uma vista da profundidade em função do deslocamento da sonda ou tempo de percurso das ondas sonoras [43, 45]. Uma das vantagens da representação *B-Scan* é indicar a distribuição dos defeitos em cada secção do componente [42].

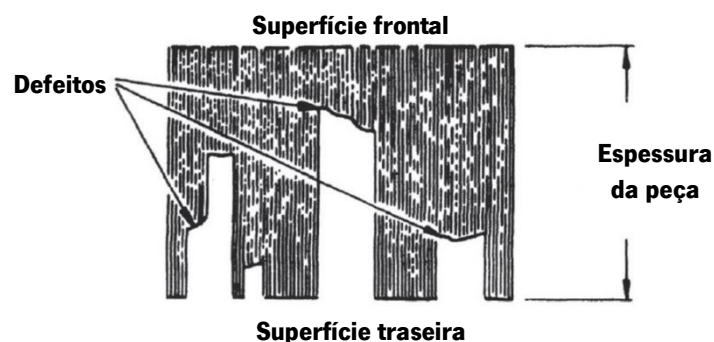


Figura 19: Representação *B-Scan* dos defeitos do componente em inspeção (adaptado de [11]).

2.9.6.3. Representação *C-Scan*

Geralmente, os dados recolhidos por um sistema automatizado de inspeção por imersão são apresentados sob a forma *C-Scan* (ver Figura 20). Este tipo de representação mostra uma vista em planta do componente em inspeção, bem como, a presença de eventuais defeitos internos [45]. Os dispositivos *C-Scan* permitem uma redução do tempo de inspeção, no entanto, não concedem qualquer informação sobre a profundidade dos defeitos [42].

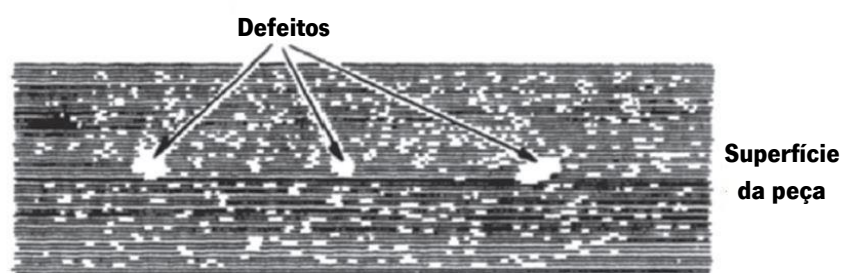


Figura 20: Representação *C-Scan* dos defeitos do componente em inspeção (adaptado de [11]).

2.9.7. Padrões de calibração

A calibração é uma ferramenta básica e que tem como objetivo assegurar um elevado nível de precisão e exatidão de um equipamento de medição. Deste modo, qualquer dispositivo de avaliação não destrutiva por ultrassons deverá ser, previamente, calibrado antes da inspeção de qualquer amostra. Para isso, é essencial o uso de um padrão de calibração [43].

Os padrões de calibração permitem a calibração de parâmetros como a sensibilidade e resolução do equipamento de ultrassons. Além disso, estes também são úteis na deteção de defeitos. Comparando o comportamento que as ondas sonoras apresentam para o componente sob inspeção com o do padrão de calibração contendo defeitos inseridos de forma deliberada, facilmente se identificam os defeitos presentes no componente [48]. O padrão de calibração deve, não só, ser constituído pelos mesmos

materiais que o componente a inspecionar, como também, por defeitos artificiais que originem um sinal semelhante ao gerado por defeitos comuns (por exemplo, delaminação, vazios e inclusões) dos componentes estruturais em material compósito [46]. Esta secção apresenta alguns dos padrões de calibração mais comuns na inspeção por ultrassons de componentes metálicos e em material compósito.

2.9.7.1. Padrões de calibração para componentes metálicos

Existe uma grande diversidade de padrões de calibração com diferentes geometrias, dimensões e sistemas de unidades, pelo que, a seleção destes depende do ensaio não destrutivo e da geometria do componente a inspecionar. Os padrões de calibração mais utilizados são os do Instituto Internacional de Soldadura (IIW), Sociedade Americana de Soldadura (AWS), e ainda, da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) [43]. A Figura 21 mostra alguns dos padrões de calibração mais empregues na indústria metalomecânica.



Bloco de calibração IIW do tipo US-1

Bloco de calibração ROMPAS

Bloco de calibração com geometria em escada

Figura 21: Padrões de calibração para componentes metálicos (adaptado de [49]).

2.9.7.2. Padrões de calibração para componentes em material compósito

A maioria dos padrões de calibração existentes no mercado são de natureza metálica (por exemplo, aço e alumínio), pelo que, somente servem os requisitos da inspeção de componentes metálicos. Não é apropriado utilizar padrões de calibração metálicos na inspeção de componentes em material compósito, pois estes possuem propriedades completamente distintas, devido à sua natureza heterogénea e anisotrópica [46]. A aplicação de materiais compósitos, nomeadamente os de matriz polimérica, nos mais diversos segmentos industriais, tem conhecido um crescimento apreciável. Assim, é de extrema importância, o desenvolvimento de cada vez mais padrões de calibração apropriados para a inspeção por ultrassons de componentes estruturais em material compósito, de modo a garantir a qualidade do processo de fabrico deste tipo de materiais. Sem esses padrões, a tarefa de inspecionar com precisão a integridade estrutural de um componente torna-se muito difícil [48, 50]. A *Techna NDT* desenvolve, exclusivamente para a *Boeing*, o padrão de calibração ST8871 (ver Figura 22) para a

inspeção não destrutiva dos aviões de transporte da *Boeing* 787. Este bloco de calibração apresenta um formato em escada (variações de espessura), sendo um laminado de matriz termoendurecível de epóxico reforçado com fibra de carbono.



Figura 22: Bloco de calibração ST8871 utilizado pela *Boeing* (adaptado de [51]).

A *Techna NDT* desenvolve padrões de calibração, não só para *Boeing*, como também para outras empresas fabricantes de aviões como a *Airbus* e ATR (*Avions de Transport Régional*). De seguida, a Figura 23 mostra alguns exemplos de padrões de calibração utilizados por estas empresas [51].



Padrão de calibração utilizado pela *Airbus*



Padrão de calibração usado pelas companhias aéreas comerciais



Padrão de calibração utilizado pela ATR

Figura 23: Padrões de calibração utilizados pelas companhias aéreas, na inspeção não destrutiva dos seus aviões (adaptado de [51]).

A *SAE International* também desenvolveu alguns padrões de calibração como o G11-STD-1, G11-STD-2, G11-STD-3 e o G11-STD-4, que permitem a avaliação não destrutiva de todos os géneros de laminados de fibra de vidro e de carbono existentes nas aeronaves. Basicamente, estes blocos de calibração (ver Figura 24) são laminados constituídos por um material denominado de G11 *Phenolic*, que possui propriedades intermédias entre os laminados de fibra de carbono e os de fibra de vidro [52].

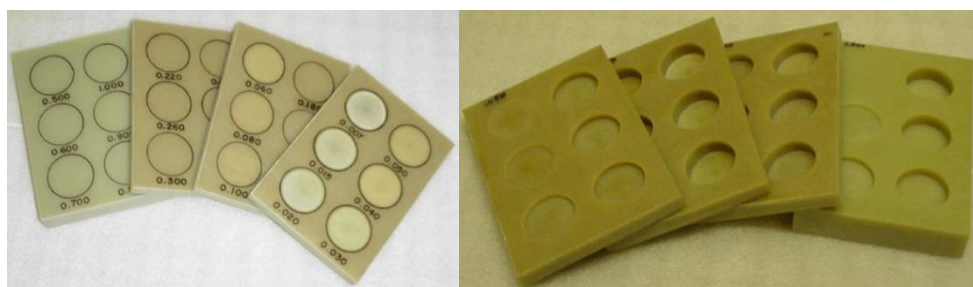


Figura 24: Bloco de calibração G11 *Phenolic* (adaptado de [52]).

3. Metodologia experimental

No presente capítulo são apresentados e descritos os materiais, bem como, os equipamentos utilizados nos ensaios. Além disso, é efetuada uma descrição da metodologia adotada na preparação e processamento das amostras em material compósito, para análise por ultrassons de defeitos.

Numa primeira fase, foram produzidos dois laminados com defeitos impostos, recorrendo ao processo de fabrico por infusão de resina assistida a vácuo (VARI). Num dos laminados foram executados furos passantes e não passantes, a fim de analisar por ultrassons, os danos associados à operação de furação. No outro laminado foram incluídos corpos estranhos, com o intuito de avaliar o efeito que cada um destes causa no sinal de ultrassons.

Numa segunda fase, e utilizando a mesma técnica de processamento, foram produzidos provetes de diferentes laminados sem defeitos, para análise UT de dois tipos de defeitos específicos: danos mecânicos e juntas adesivas. Os danos mecânicos foram induzidos por ação de diferentes esforços mecânicos controlados, como impacto de baixa energia e flexão. As juntas adesivas (colagens entre laminados), por sua vez, foram avaliadas quanto à sua qualidade, tendo sido também submetidas a solicitações mecânicas controladas, nomeadamente tração, de forma a causar danos nas ligações.

3.1. Materiais

Os laminados em material compósito foram produzidos usando os seguintes constituintes:

- i) **Matriz:** resina de epóxico *Biresin®* CR83, combinado com o catalisador CH83-6. A relação da mistura entre a resina de epóxico e o catalisador utilizada foi de 100:30, em massa, tal como recomendado pelo fabricante;
- ii) **Fibras de vidro:** tecidos tafetá 0°/90° de fibra de vidro E e uma gramagem de 200 g/m². De referir que nestes tecidos, os filamentos são entrançados entre si, como forma de manter a sua estrutura bidimensional;
- iii) **Fibras de carbono:** tecidos tafetá 0°/90° e uma gramagem de 195 g/m².

3.2. Infusão de resina assistida a vácuo (VARI)

Todos os laminados produzidos durante este trabalho, foram obtidos única e exclusivamente, a partir da técnica VARI. Por isso, é apresentado, de seguida, uma descrição detalhada do procedimento seguido no processamento dos laminados.

3.2.1. Preparação do processo

Para a realização do processo de infusão foi necessário um molde. Esse molde consistiu num vidro completamente transparente, de espessura significativa, e com uma área adequada de modo a permitir quer a colocação dos materiais de reforço, quer a fixação do saco de vácuo. A sua transparência e espessura significativa permitiu por um lado, a observação do escoamento da resina durante o processo de infusão e, por outro, resistir à aplicação da pressão de vácuo.

Depois da delimitação com fita adesiva de papel da superfície a usar, aplicou-se por três vezes o agente desmoldante *HP7*, com o intuito de facilitar, numa fase posterior, a remoção do laminado do molde. De referir que, em cada uma das aplicações foi necessário um tempo de secagem de alguns minutos. De seguida, a fita adesiva de papel foi substituída por uma fita adesiva de vedação, habitualmente denominada de *tacky tape*. Posteriormente, procedeu-se à colocação das fibras de reforço, que compõem o laminado no molde, a seco. Estas foram cobertas com *peel ply* e *flow mesh*, respetivamente. O *peel ply* é um tecido fino, que facilita a remoção do *flow mesh* e do laminado, depois do processo de cura estar concluído. Por isso, este tecido deve possuir dimensões ligeiramente superiores às do material de reforço. O *flow mesh* é uma rede em termoplástico que promove o aumento do fluxo de resina, assim como, uma distribuição uniforme desta ao longo da superfície do laminado. Quando se coloca o *flow mesh* sobre o *peel ply*, este deve cobrir, aproximadamente, 80% da área do laminado. Recorrendo a uma fita adesiva, o *peel ply* e o *flow mesh* foram fixados ao molde, para evitar o deslocamento destes no decorrer da aplicação de vácuo.

Após a introdução do *flow mesh*, procedeu-se à colocação, segundo a estratégia de infusão predefinida, de dois tubos tipo espiral (também designados de *runners*) ligados a dois canais de alimentação de resina. Um dos canais de alimentação foi ligado à bomba de vácuo e o outro ao recipiente contendo a resina. Depois de tudo estar devidamente condicionado no molde, o filme de vácuo foi selado em toda a sua periferia, sendo este pressionado contra o *tacky tape*. Após o fecho do molde com a película de vácuo, o canal de alimentação que irá estar ligado ao recipiente com a resina, foi ligado a um pressostato e aplicou-se vácuo, de modo a extrair o ar do interior do saco de vácuo. Depois da extração de ar, o laminado ficou compactado e, portanto, passou-se à fase seguinte, em que foi necessário efetuar a verificação de todo o perímetro do saco de vácuo, com o objetivo de detetar possíveis fugas de ar. Para isto, o canal de alimentação ligado à bomba de vácuo, foi fechado com recurso a um grampo e verificou-se, durante cerca de 30 minutos, o valor da pressão absoluta no interior do saco de vácuo. Caso o valor da depressão total do sistema aumente, significa que existem entradas de ar, pelo que, é necessário

averiguar a selagem do saco de vácuo, pressionando este contra o *tacky tape*. Garantida a vedação total do sistema, deu-se início à infusão de resina.

3.2.2. Processamento por infusão de resina a vácuo

Terminada a etapa anterior, deu-se início à preparação da resina. Como já foi referido previamente, apenas se usou neste trabalho a resina de epóxico *Biresin*® CR83. O fabricante recomenda a utilização do catalisador CH83-6 numa relação de 30% para 100% da massa de resina. No presente trabalho, usou-se sempre o mesmo critério na preparação da resina necessária ao fabrico dos vários laminados. A quantidade de resina a preparar e usar, dependeu da soma dos volumes do laminado a produzir, das camadas de *peel ply* e *flow mesh*, bem como, do necessário para preencher os canais tipo espiral e de alimentação. Após o cálculo destes volumes, pesou-se a massa de resina determinada, com o auxílio de uma balança e adicionou-se a quantidade correspondente de catalisador. Com o recurso a uma vareta, misturou-se o catalisador com a resina existente no recipiente até se obter uma mistura homogênea. De seguida, essa mistura foi colocada numa estufa, durante alguns minutos, de modo a sujeitá-la ao processo de *degasing* (desgaseificação sob vácuo) a fim de remover as bolhas de ar. Posto isto, o canal de alimentação foi introduzido no interior do recipiente contendo a mistura de resina com catalisador. A aplicação da pressão máxima (965 mbar) originada pela bomba de vácuo permitiu o deslocamento da resina pelos canais de alimentação, assim como, a impregnação das fibras de reforço. No final do processo de infusão, diminuiu-se a pressão para 400 mbar e manteve-se esse valor até à cura total do laminado. A Figura 25 ilustra a montagem experimental final efetuada para um dos vários laminados produzidos ao longo deste trabalho.

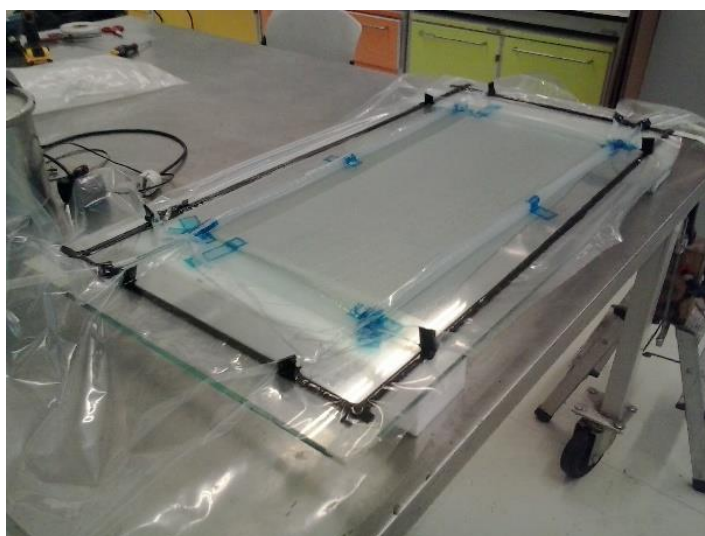


Figura 25: Impregnação de fibras de vidro através da infusão de resina de epóxico.

3.3. Dano na furação de laminados de fibra de vidro/epóxico

3.3.1. Produção e furação das placas

Para realizar o trabalho experimental proposto, foi fabricado através do processo VARI, um laminado de fibra de vidro com matriz termoendurecível do tipo epóxico, com as dimensões de 660×310 mm². Para a conceção deste laminado, foram cortadas um total de quinze camadas de fibra de vidro, na forma de tecido tafetá. Na Figura 26 está ilustrado o laminado obtido a partir do processo de produção VARI.



Figura 26: Placa de fibra de vidro/epóxico fabricada através do processo de produção VARI.

A cura do laminado decorreu à temperatura ambiente, durante um período de vinte e quatro horas e a uma pressão de 400 mbar. Após a desmoldagem do laminado, este foi cortado recorrendo a uma serra de disco, de modo a extrair dele duas placas, ambas com uma área útil de 320×290 mm². De forma a facilitar a compreensão do trabalho executado, foram empregues denominações para identificar as placas. Assim, um dos laminados foi designado de **F_1**, sendo a sua espessura final de $2,98 \pm 0,06$ mm. A outra placa foi denominada de **F_2** e a sua espessura final foi de $3,09 \pm 0,13$ mm. Para as operações de furação foram utilizadas brocas de geometria helicoidal e de diâmetros distintos, como mostra a Figura 27.



Figura 27: Brocas helicoidais de vários diâmetros, usadas nas operações de furação.

De referir que na placa F_1 (ver Anexo A) foram executados, única e exclusivamente, furos não passantes enquanto na placa F_2 (ver Anexo B) apenas furos passantes. Em ambos os laminados, foram realizadas furações, pelo lado que esteve em contacto com o saco de vácuo, durante o processo de produção VARI. A disposição e as dimensões dos furos são idênticas em ambas as placas, tal como mostram as Figuras 28 e 29. A Tabela 7 apresenta os diâmetros de cada furo e respetiva denominação. As furações foram analisadas utilizando a técnica de ultrassons.

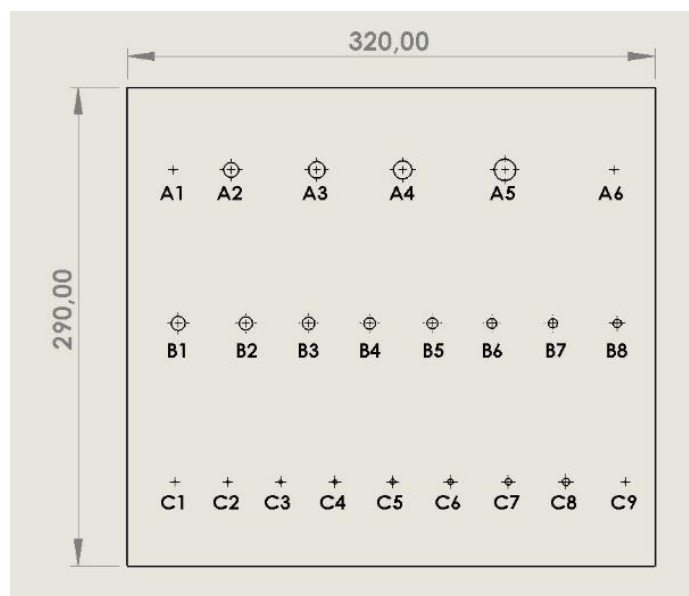


Figura 28: Disposição dos furos executados no laminado F_1.

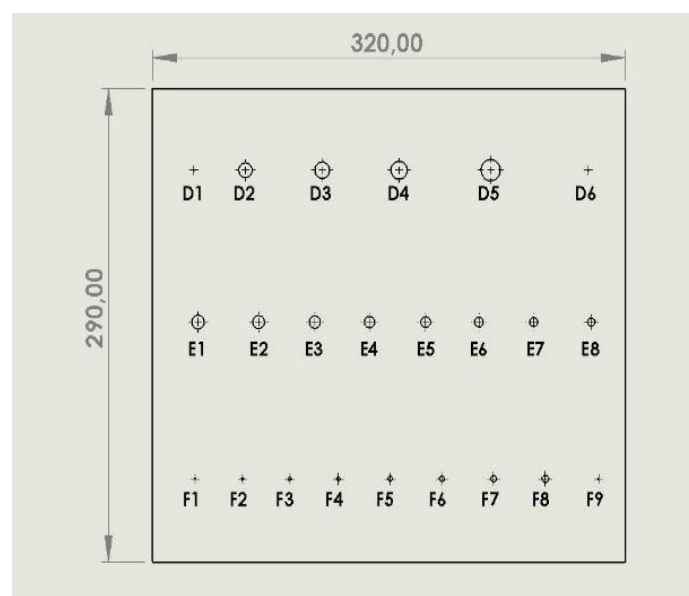


Figura 29: Disposição dos furos executados no laminado F_2.

Tabela 7: Designação dos furos e respetivo diâmetro.

Designação dos furos	Diâmetro dos furos [mm]
A1, A6, C1, C9, D1, D6, F1, F9	1
A2, D2	9
A3, D3	10
A4, D4	11
A5, D5	13
B1, E1	8,5
B2, E2	8
B3, E3	7,5
B4, E4	7
B5, E5	6,5
B6, E6	6
B7, E7	5,5
B8, E8	5
C2, F2	1,5
C3, F3	2
C4, F4	2,5
C5, F5	3
C6, F6	3,5
C7, F7	4
C8, F8	4,5

3.4. Preparação e processamento de laminado de fibra de vidro/epóxico contendo inclusões

Com o objetivo de avaliar o efeito que uma inclusão origina no sinal de ultrassons, foi produzido através do processo VARI, um laminado de fibra de vidro/epóxico contendo corpos estranhos. Algumas das inclusões inseridas neste laminado são materiais, amplamente, empregues no fabrico de componentes em material compósito. A Figura 30 apresenta os materiais que foram introduzidos entre as camadas do laminado.



Figura 30: Materiais inseridos de forma deliberada entre as camadas de fibra de vidro.

Decidiu-se produzir um laminado com uma geometria semelhante ao padrão de calibração em forma de escada (*Step Block*) utilizado pela indústria metalomecânica, na inspeção por UT de componentes metálicos. Antes da operação de corte das várias camadas de tecido tafetá $0^\circ/90^\circ$, definiu-se que a área útil do laminado seria de $420 \times 300 \text{ mm}^2$ e com cinco variações de espessura, tal como ilustra a Figura 31.

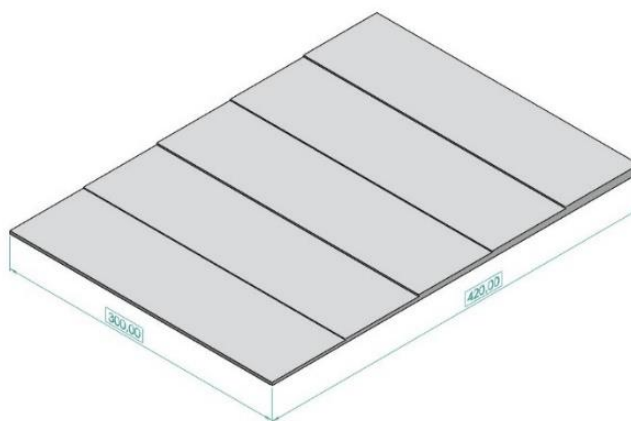


Figura 31: Desenho 3D do *Step Block* com cinco variações de espessura.

Tendo em conta que a espessura de uma camada de tecido tafetá é de aproximadamente 0,1 mm, definiu-se que as cinco espessuras a adotar na conceção do laminado seriam 1,5 mm, 2 mm, 3 mm, 3,5 mm e 4,5 mm, como mostra a Figura 32.

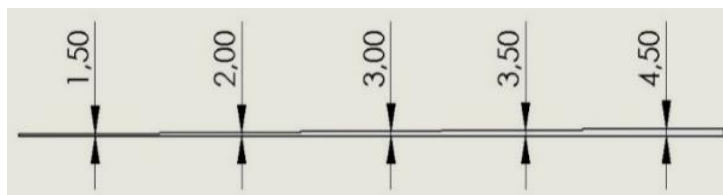


Figura 32: Espessura de cada escada após o empilhamento das camadas de fibra de vidro.

A operação de corte das camadas de tecido tafetá foi executada, de acordo com a informação contida na Tabela 8.

Tabela 8: Operação de corte das camadas de tecido tafetá.

Dimensões [mm × mm]	Número de camadas
420×300	16
336×300	5
252×300	10
168×300	5
84×300	10

Para a criação do *Step Block*, foram necessárias um total de quarenta e seis camadas de tecido tafetá. Após o corte do número de camadas necessárias, iniciou-se o processo de colocação das inclusões entre as camadas de fibra de vidro. Definiu-se que a geometria das inclusões seria quadrada e de sete tamanhos distintos. A disposição destas no laminado foi segundo o que está representado na Figura 33. A Tabela 9 apresenta informações sobre os materiais inseridos, como a sua localização em termos de camadas e dimensões. Para facilitar a compreensão do trabalho executado, foram dadas as designações de A, B, C, D, E e F a cada material.

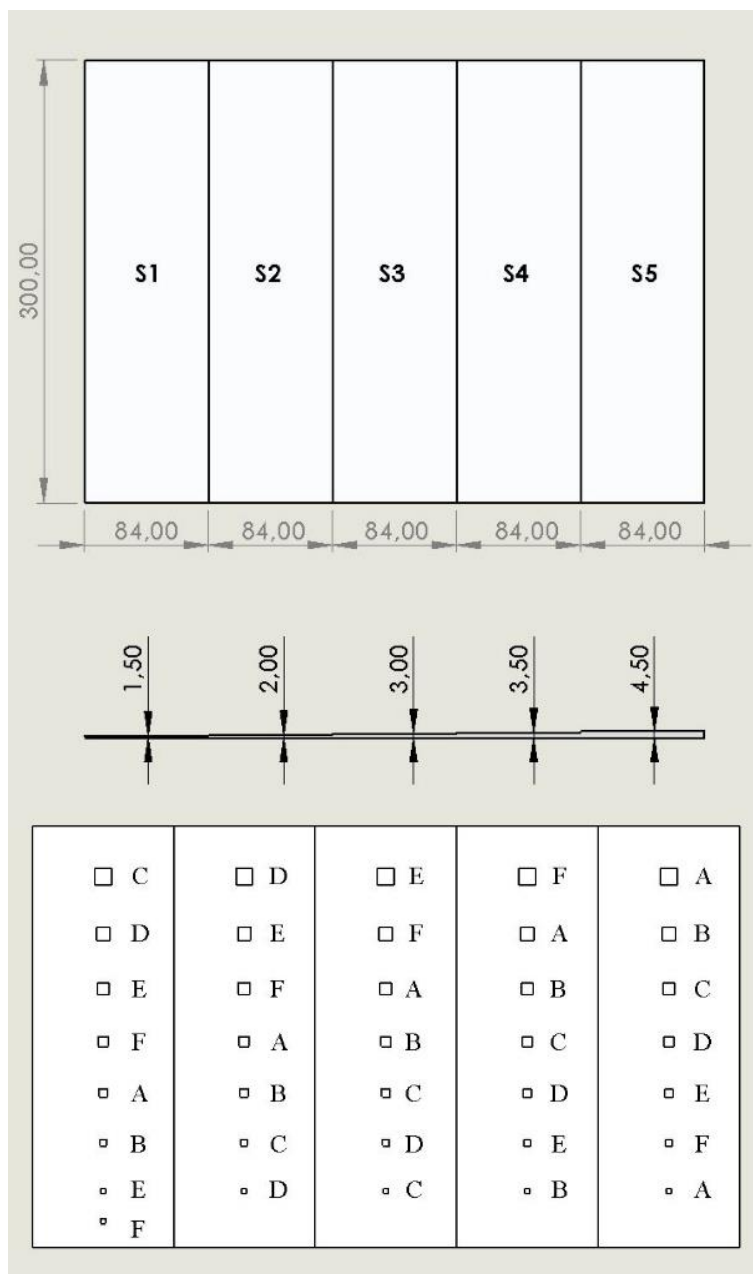


Figura 33: Disposição das inclusões no laminado.

Tabela 9: Localização das inclusões em termos de camadas e respetivas dimensões.

Zona	Materiais	Designação	Dimensões [mm²]	Localização
S1 (15 camadas)	<i>Peel ply</i>	C	10 × 10	Camada 4
	Fita adesiva	D	8 × 8	Camada 4
	PET/Al/PE	E	7 × 7	Camada 9
	Alumínio	F	6 × 6	Camada 9
	Filme de vácuo	A	5 × 5	Camada 13
	<i>Teflon™</i>	B	4 × 4	Camada 13
	PET/Al/PE	E	3 × 3	Camada 14
	Alumínio	F	3 × 3	Camada 14
S2 (5 camadas)	Fita adesiva	D	10 × 10	Camada 11
	PET/Al/PE	E	8 × 8	Camada 11
	Alumínio	F	7 × 7	Camada 11
	Filme de vácuo	A	6 × 6	Camada 11
	<i>Teflon™</i>	B	5 × 5	Camada 11
	<i>Peel ply</i>	C	4 × 4	Camada 11
	Fita adesiva	D	3 × 3	Camada 14
S3 (10 camadas)	PET/Al/PE	E	10 × 10	Camada 4
	Alumínio	F	8 × 8	Camada 4
	Filme de vácuo	A	7 × 7	Camada 16
	<i>Teflon™</i>	B	6 × 6	Camada 16
	<i>Peel ply</i>	C	5 × 5	Camada 28
	Fita adesiva	D	4 × 4	Camada 28
	<i>Peel ply</i>	C	3 × 3	Camada 14
S4 (5 camadas)	Alumínio	F	10 × 10	Camada 19
	Filme de vácuo	A	8 × 8	Camada 19
	<i>Teflon™</i>	B	7 × 7	Camada 19
	<i>Peel ply</i>	C	6 × 6	Camada 19
	Fita adesiva	D	5 × 5	Camada 19
	PET/Al/PE	E	4 × 4	Camada 19
	<i>Teflon™</i>	B	3 × 3	Camada 14
S5 (10 camadas)	Filme de vácuo	A	10 × 10	Camada 4

<i>Teflon™</i>	B	8 × 8	Camada 4
<i>Peel ply</i>	C	7 × 7	Camada 24
Fita adesiva	D	6 × 6	Camada 24
PET/Al/PE	E	5 × 5	Camada 43
Alumínio	F	4 × 4	Camada 43
Filme de vácuo	A	3 × 3	Camada 14

De referir que foi necessário a aplicação de um *spray* adesivo, para fixar cada uma das inclusões nas camadas de tecido tafetá pretendidas. A cura do laminado decorreu à temperatura ambiente, durante um período de vinte e quatro horas e a uma pressão de 400 mbar. Após a desmoldagem do laminado, foram determinadas as espessuras finais das áreas S1 a S5. A Tabela 10 mostra as espessuras médias dessas áreas. De mencionar que este laminado (ver Figura 34 e Anexo C) foi denominado de **C_1**.

Tabela 10: Espessuras finais das zonas S1, S2, S3, S4 e S5.

Zona do laminado	Espessura [mm]
S1	3,13 ± 0,05
S2	4,04 ± 0,07
S3	5,83 ± 0,07
S4	6,95 ± 0,04
S5	8,60 ± 0,11



Figura 34: Laminado C_1 contendo inclusões de várias dimensões, distribuídas por cinco zonas de diferente espessura, sendo esta crescente do lado direito da figura, para o lado esquerdo.

3.5. Dano de impacto de baixa energia

3.5.1. Produção de provetes de laminados de fibra de vidro/epóxico e de carbono/epóxico

Esta atividade experimental teve como objetivo principal, o uso da técnica de análise não destrutiva de UT, na inspeção da integridade de provetes de laminados em material compósito, submetidos a solicitações de impacto de baixa energia. Com este propósito foram produzidos a partir do processo VARI, dois laminados: um de fibra de vidro/epóxico e outro de carbono/epóxico, de modo que fosse possível extrair de cada um deles, dez provetes para os ensaios de impacto.

Através da análise da norma ASTM D 7136/D 7136 M – 07, verificou-se que os provetes deviam possuir as dimensões de $150 \times 100 \text{ mm}^2$. Tendo em conta estas dimensões foram produzidos dois laminados, ambos constituídos por quinze camadas de tecido tafetá $0^\circ/90^\circ$ e com uma área útil de $560 \times 330 \text{ mm}^2$.

A cura dos laminados decorreu à temperatura ambiente, durante um período de vinte e quatro horas e a uma pressão de 400 mbar. Após o período de cura, realizou-se a desmoldagem das duas placas, bem como, o corte dos vinte provetes (ver Figura 35), através de uma serra de disco e segundo as dimensões requeridas para os ensaios de impacto.



Figura 35: Amostras para ensaios de impacto de baixa energia - (a) provetes de fibra de vidro/epóxico; (b) provetes de carbono/epóxico.

De modo a facilitar a compreensão do trabalho executado, foram dadas denominações para identificar os provetes. A Tabela 11 apresenta a designação concedida a cada provete de fibra de vidro/epóxico, bem como, as suas dimensões e espessura média.

Tabela 11: Dimensões e espessura média de cada provete de fibra de vidro/epóxico.

Designação dos provetes	Espessura [mm]	Dimensões [mm]
Placa 1	$3,02 \pm 0,03$	Comprimento = 150,41 Largura = 99,77
Placa 2	$3,02 \pm 0,06$	Comprimento = 151,44 Largura = 100,28
Placa 3	$3,00 \pm 0,03$	Comprimento = 151,44 Largura = 101,38
Placa 4	$3,03 \pm 0,02$	Comprimento = 151,18 Largura = 100,50
Placa 5	$2,98 \pm 0,02$	Comprimento = 150,21 Largura = 101,07
Placa 6	$2,98 \pm 0,02$	Comprimento = 150,52 Largura = 100,44
Placa 7	$2,92 \pm 0,09$	Comprimento = 150,43 Largura = 100,79
Placa 8	$2,94 \pm 0,07$	Comprimento = 150,17 Largura = 99,95
Placa 9	$3,03 \pm 0,04$	Comprimento = 150,83 Largura = 100,18
Placa 10	$3,00 \pm 0,03$	Comprimento = 150,01 Largura = 99,86

A Tabela 12 mostra a denominação dada a cada provete de carbono/epóxico, assim como, as suas dimensões e espessura média.

Tabela 12: Dimensões e espessura média de cada provete de carbono/epóxico.

Designação das amostras	Espessura [mm]	Dimensões [mm]
CF_Plate_1	3,69 ± 0,01	Comprimento = 151,79 Largura = 103,06
CF_Plate_2	3,72 ± 0,02	Comprimento = 151,70 Largura = 102,20
CF_Plate_3	3,72 ± 0,02	Comprimento = 151,04 Largura = 103,23
CF_Plate_4	3,74 ± 0,02	Comprimento = 151,97 Largura = 103,02
CF_Plate_5	3,69 ± 0,01	Comprimento = 151,76 Largura = 102,38
CF_Plate_6	3,74 ± 0,03	Comprimento = 151,92 Largura = 103,44
CF_Plate_7	3,65 ± 0,02	Comprimento = 151,44 Largura = 101,60
CF_Plate_8	3,68 ± 0,02	Comprimento = 151,72 Largura = 102,95
CF_Plate_9	3,73 ± 0,02	Comprimento = 151,79 Largura = 103,26
CF_Plate_10	3,69 ± 0,01	Comprimento = 151,88 Largura = 101,62

3.5.2. Ensaio de impacto de baixa energia

O objetivo dos ensaios de impacto é testar provetes com geometria específica e determinar a sua resistência a danos. Estes ensaios baseiam-se na queda de um impactor de massa conhecida, a partir de uma altura predeterminada, que solicita a amostra, colocada num plano horizontal [4]. A energia de impacto corresponde à energia potencial gravítica do impactor (E_{PG}), a qual depende da sua massa (m) e da altura (h) a que se encontra, como expressa a equação (8).

$$E_{PG} = mgh \quad (8)$$

Onde:

- E_{PG} representa a energia potencial gravítica do impactor em (J);

- m é a massa do impactor em (kg);
- g corresponde à aceleração gravítica (m/s^2);
- h representa a altura de queda do impactor (m) [53].

Condições experimentais

O ensaio foi efetuado na máquina de ensaio de impacto, instalada no laboratório de ensaios mecânicos do PIEP - Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros. A máquina de impacto utilizada foi um dispositivo de ensaio por queda de dardo *CEAST Fractovis Plus* (ver Figura 36), completamente instrumentada e com um sistema de aquisição de dados. Esta máquina apresenta um limite máximo de energia de cerca de 700 J, e permite medir a força de impacto em função do tempo/deflexão, bem como, a energia absorvida pelo material, durante o impacto originado pela queda livre de uma massa a uma determinada velocidade/altura. O impactor utilizado tinha cabeça hemisférica, diâmetro de 20 mm e massa de 0,745 kg.



Figura 36: Dispositivo de ensaio por queda de peso *CEAST Fractovis Plus*.

Segundo a norma ASTM D 7136/D 7136 M – 07, prepararam-se dez provetes de fibra de vidro/epóxico e outros dez de carbono/epóxico, com as dimensões de, aproximadamente $150 \times 100 \text{ mm}^2$. As espessuras dos provetes de fibra de vidro/epóxico variaram entre 2,92 mm e 3,03 mm, enquanto as dos provetes de carbono/epóxico oscilaram entre 3,65 mm e 3,74 mm. Os provetes de fibra de vidro/epóxico foram submetidos a diferentes níveis de energia de impacto,

tal como os provetes de carbono/epóxico. No caso dos provetes de fibra de vidro/epóxico, as energias de impacto variaram entre 1 J e 80,3 J, ao passo que, nos provetes de carbono/epóxico o intervalo de energias de impacto foi entre 4 J e 80,3 J. Após os ensaios de impacto, os provetes foram submetidos a uma análise UT, para avaliar a extensão da área de dano sob várias energias de impacto.

3.6. Dano induzido por ação de esforços de flexão

3.6.1. Fabrico de provetes de laminados de fibra de vidro/epóxico

Este trabalho experimental teve como objetivo, verificar em laminados em material compósito, a detetabilidade do dano induzido por esforços de flexão controlados (sem a ocorrência de rotura), através do método de ultrassons. Assim, a partir do processo de produção VARI, foi fabricado um laminado de fibra de vidro/epóxico, para que fosse possível extrair dele, dez provetes para os ensaios de flexão em três pontos.

Através da análise da norma ISO 14125, verificou-se que os provetes deviam apresentar as dimensões de 92×25 mm². Como o laminado em estudo é reforçado com fibra de vidro, esta norma recomenda que, a distância entre os suportes de apoio seja igual a vinte vezes a espessura do provete. A distância entre os suportes de apoio (*span*) deve obedecer à seguinte expressão:

$$\frac{L}{h} = 20 \quad (9)$$

Em que:

- L corresponde à distância entre os suportes de apoio [mm];
- h é a espessura do provete [mm].

Tendo em atenção a espessura do provete, aproximadamente 3 mm, considerou-se então um *span* de 60 mm. Por outro lado, a norma exige que os provetes apresentem um comprimento mínimo, para garantir uma folga para lá dos apoios de 10% para cada lado. Posto isto, o comprimento final dos provetes foi de 92 mm. Considerando estas dimensões, decidiu-se produzir um laminado constituído por quinze camadas de tecido tafetá 0°/90° e com uma área útil de 360×112 mm².

A cura do laminado decorreu à temperatura ambiente, durante um período de vinte e quatro horas e a uma pressão de 400 mbar. Após o período de cura, realizou-se a desmoldagem da placa, assim como, o corte dos dez provetes (ver Figura 37), através de uma serra de disco.



Figura 37: Provetes de fibra de vidro/epóxico para ensaios de flexão em três pontos.

De forma a facilitar a compreensão do trabalho executado, foram dadas designações para identificar os provetes. A Tabela 13 apresenta não só a denominação de cada provete, como também as suas dimensões e espessura média.

Tabela 13: Dimensões e espessura média de cada provete de fibra de vidro/epóxico.

Designação dos provetes	Espessura [mm]	Dimensões [mm]
Placa A	$2,86 \pm 0,02$	Comprimento = 92,17 Largura = 26,25
Placa B	$2,62 \pm 0,12$	Comprimento = 93,21 Largura = 24,99
Placa C	$2,79 \pm 0,04$	Comprimento = 92,61 Largura = 24,56
Placa D	$2,80 \pm 0,01$	Comprimento = 92,06 Largura = 24,63
Placa E	$2,79 \pm 0,05$	Comprimento = 92,77 Largura = 24,74
Placa F	$2,48 \pm 0,04$	Comprimento = 92,41 Largura = 25,09
Placa G	$2,84 \pm 0,02$	Comprimento = 92,61 Largura = 24,83
Placa H	$2,47 \pm 0,01$	Comprimento = 92,37 Largura = 24,60
Placa I	$2,66 \pm 0,01$	Comprimento = 92,57 Largura = 24,73
Placa J	$2,87 \pm 0,05$	Comprimento = 92,07 Largura = 25,08

3.6.2. Ensaio de flexão

No presente trabalho realizaram-se ensaios de flexão em três pontos (ver Figura 38), segundo a norma ISO 14125. Fundamentalmente, estes ensaios consistem na colocação de uma amostra sobre dois apoios inferiores, tendo em atenção a sua simetria e alinhamento. O cabeçote da máquina desce até encostar no provete, sendo aplicada neste uma carga no ponto intermédio. Durante o ensaio, o provete é submetido a tensões normais de compressão na parte superior e a tensões normais de tração na parte inferior. Geralmente, o objetivo dos ensaios de flexão é obter quer a tensão quer o módulo de elasticidade em flexão [4].

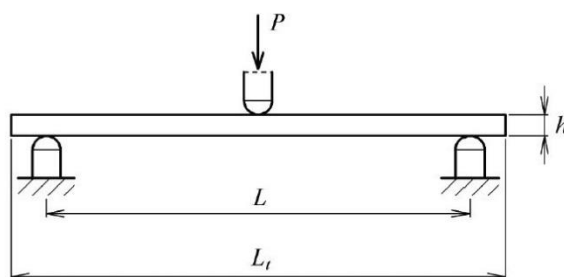


Figura 38: Ensaio de flexão em três pontos (adaptado de [4]).

Condições experimentais

O ensaio de flexão em três pontos foi efetuado na máquina de ensaio de flexão, instalada no laboratório de ensaios mecânicos do PIEP - Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros. A máquina usada foi o dispositivo universal de ensaios mecânicos *Shimadzu AGS-X*, tal como se pode observar na Figura 39, sendo este constituído por uma célula de carga de 50 kN. Para esses ensaios utilizou-se uma distância entre os suportes de apoio de 60 mm e uma velocidade de deflexão de 0,89 mm/min.



Figura 39: Dispositivo de ensaio de flexão *Shimadzu AGS-X*.

Com base na norma ISO 14125, prepararam-se dez provetes de fibra de vidro/epóxico, com as dimensões de, aproximadamente, $92 \times 25 \text{ mm}^2$. As espessuras dos provetes variaram entre 2,47 mm e 2,87 mm. Os provetes de fibra de vidro/epóxico foram sujeitos a forças de carregamento entre 651,8 N e 969,5 N. Após os ensaios de flexão, as amostras foram analisadas por UT, de modo a caracterizar o dano que estas sofreram, sob vários níveis de carga.

3.7. Dano induzido por ação de esforços de tração em juntas adesivas

O princípio deste trabalho tem por base o desenvolvimento de juntas adesivas de sobreposição simples, usando substratos de fibra de vidro/epóxico e diferentes áreas de sobreposição. Com esta atividade experimental pretendeu-se avaliar a qualidade das juntas adesivas fabricadas, assim como, analisar por ultrassons o dano induzido nestas, através da ação de solicitações de tração controladas (sem a ocorrência de rotura). Na presente secção é apresentada uma descrição do processo de fabrico das juntas adesivas, desde a preparação das superfícies até à preparação final dos provetes, passando pela colagem dos substratos.

3.7.1. Materiais selecionados

Os substratos necessários para a execução das juntas adesivas foram fabricados a partir de um laminado de fibra de vidro, com matriz termoendurecível de epóxico *Biresin*® CR83. Esta resina foi misturada com o catalisador CH83-6, numa relação ponderal de 30% de catalisador para 100% de resina. Utilizou-se fibras de vidro na forma de tecido tafetá com orientação 0°/90°.

Para a realização das colagens entre os substratos usou-se somente o adesivo de epóxico *Elantas Elan-tech*® AS 89.1/ AW 89.2 – ADH 891.892. Este adesivo vem em pasta num tubo com dois reservatórios, um de resina e outro de catalisador.

3.7.2. Produção de laminado de fibra de vidro/epóxico para obtenção de substratos e *tabs*

A partir do processo de produção VARI, foi fabricado um laminado de fibra de vidro/epóxico, de modo que fosse possível extrair dele, pelo menos vinte substratos (dez provetes), assim como, vinte *tabs*. Os *tabs* são colados nas extremidades dos provetes e têm como função eliminar as excentricidades das condições de apoio no dispositivo de ensaios de tração.

Com base na análise das normas ASTM D3163 – 01 (2014) e ASTM D1002 – 10, decidiu-se que dez substratos teriam as dimensões de 114×25 mm², ao passo que, os outros dez possuiriam as dimensões de 114×50 mm². Em relação às dimensões dos *tabs*, definiu-se que dos vinte *tabs*, dez teriam as dimensões de 25×25 mm² enquanto os restantes possuiriam as dimensões de 50×25 mm². Tendo em conta estas dimensões, decidiu-se produzir um laminado constituído por quinze camadas de tecido tafetá 0°/90° e com uma área útil de 640×300 mm².

A cura do laminado decorreu à temperatura ambiente, durante um período de vinte e quatro horas e a uma pressão de 400 mbar. Após o período de cura, realizou-se a desmoldagem da placa, bem como, o corte dos substratos e *tabs* necessários, através de uma serra de disco (ver Figura 40).



Substratos de fibra de vidro/epóxico de dimensões 114×50 mm²



Substratos de fibra de vidro/epóxico de dimensões 114×25 mm²



***Tabs* de fibra de vidro/epóxico de dimensões 50×25 mm²**



***Tabs* de fibra de vidro/epóxico de dimensões 25×25 mm²**

Figura 40: Substratos e *tabs* de fibra de vidro/epóxico para a execução de juntas adesivas de sobreposição simples.

3.7.3. Geometria das juntas de sobreposição simples

Como indicado anteriormente, pretendeu-se ensaiar à tração juntas de sobreposição simples, conforme ilustra a Figura 41, usando a mesma espessura de adesivo, mas com diferentes áreas de sobreposição. Deste modo, definiu-se que de um total de dez provetes produzidos, cinco teriam uma área de sobreposição de 25×25,5 mm², enquanto os restantes possuiriam uma área de 50×25,5 mm². Decidiu-se que a espessura do adesivo seria de 0,5 mm em todos os provetes.



Figura 41: Junta adesiva de sobreposição simples.

As principais dimensões das juntas adesivas com área de sobreposição de $25 \times 25,5 \text{ mm}^2$ são apresentadas na Figura 42, bem como, na Tabela 14.



Figura 42: Desenho 2D de uma junta de sobreposição simples com área de sobreposição de $25 \times 25,5 \text{ mm}^2$.

Tabela 14: Principais dimensões das juntas adesivas de área de sobreposição de $25 \times 25,5 \text{ mm}^2$.

Comprimento de sobreposição [mm]	Dimensões dos substratos [mm²]	Dimensões dos <i>tabs</i> [mm²]	Comprimento total do provete [mm]	Comprimento útil do provete entre garras [mm]
25,5	114×25	25×25	202,5	152,5

As principais dimensões dos provetes de área de sobreposição de $50 \times 25,5 \text{ mm}^2$ são apresentadas na Figura 43 e na Tabela 15.

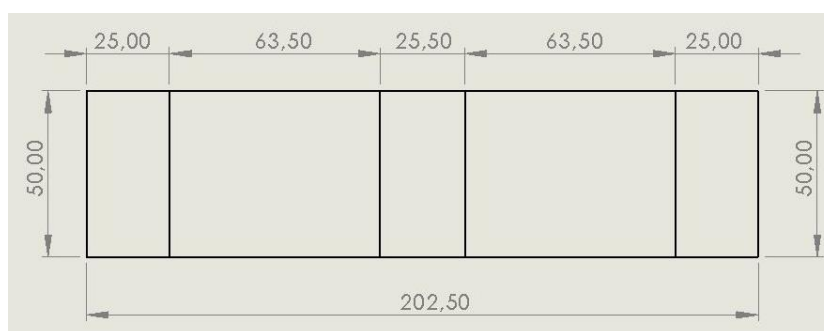


Figura 43: Desenho 2D de uma junta adesiva de área de sobreposição de $50 \times 25,5 \text{ mm}^2$.

Tabela 15: Principais dimensões das juntas adesivas de área de sobreposição de $50 \times 25,5 \text{ mm}^2$.

Comprimento de sobreposição [mm]	Dimensões dos substratos [mm²]	Dimensões dos <i>tabs</i> [mm²]	Comprimento total do provete [mm]	Comprimento útil dos provetes entre garras [mm]
25,5	114×25	50×25	202,5	152,5

3.7.4. Preparação e execução das juntas adesivas

A preparação de juntas de sobreposição simples iniciou-se com a criação de dois suportes para a fixação dos substratos e *tabs*. Para o dimensionamento destes suportes, também denominados de *gabarits*, recorreu-se ao *software* de CAD 3D *SolidWorks*.

Os *gabarits* têm como função, por um lado, evitar o deslocamento dos substratos e *tabs*, por outro garantir o alinhamento destes, durante o processo de aplicação do adesivo. A Figura 44 mostra o desenho 2D de um dos suportes. Os dois *gabarits* possuem exatamente as mesmas dimensões, permitindo a colagem simultânea de dez provetes e vinte *tabs*.

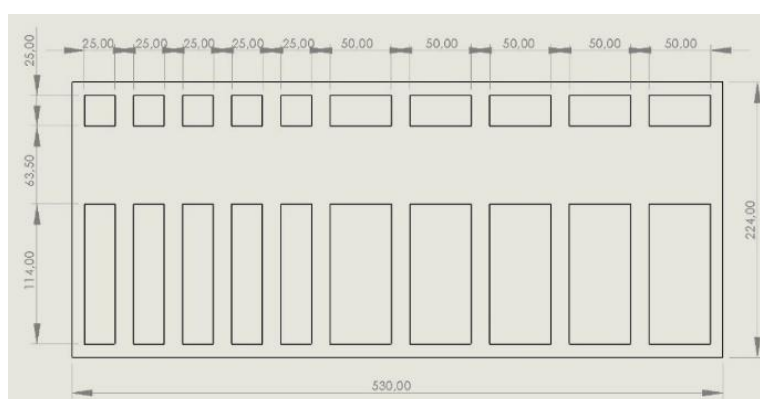


Figura 44: Desenho 2D de um dos *gabarits*.

De referir que, durante o fabrico das juntas adesivas, um dos *gabarits* foi colocado numa posição contrária em relação ao outro, de modo a assegurar a área de sobreposição dos substratos pretendida (ver Figura 45).

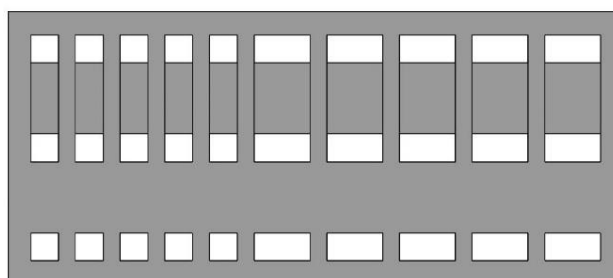


Figura 45: *Assembly* dos dois *gabarits*.

No fabrico dos dois *gabarits* (ver Figura 46), decidiu-se usar uma placa de Poli(metacrilato de metilo) (PMMA) de 3,5 mm de espessura e com uma área suficiente, para posteriormente ser maquinada a *laser*.

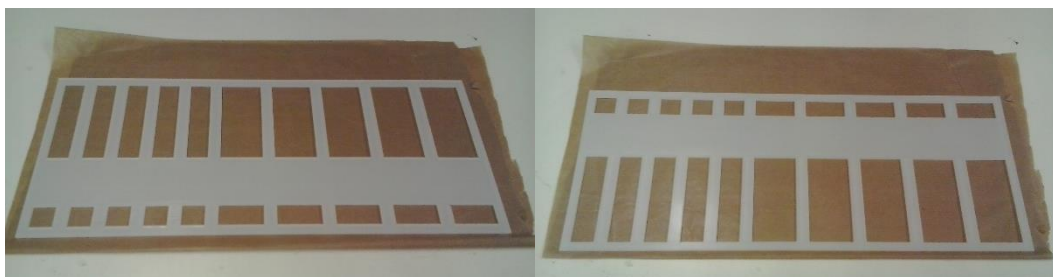


Figura 46: Aspeto final dos *gabarits* após terem sido maquinados a *laser*.

Após o fabrico dos *gabarits*, deu-se início à preparação dos substratos e *tabs* necessários para as colagens. Em primeiro lugar, procedeu-se a uma retificação dos substratos, assim como, dos *tabs* através de uma lixa, de forma a permitir o seu encaixe nos *gabarits*. Posto isto, passou-se ao tratamento das superfícies de colagem (área de sobreposição dos substratos e de colagem dos *tabs*), visto que, esta é essencial para o estabelecimento de uma forte ligação. Inicialmente, executou-se a delimitação com fita adesiva de papel, das áreas de sobreposição e de colocação dos *tabs* nos vinte substratos. O passo seguinte envolveu a abrasão das superfícies dos substratos e *tabs*, através de uma lixa, com o objetivo de aumentar a rugosidade e a área de contacto entre o adesivo e o substrato. Depois executou-se a limpeza das superfícies com papel embebido em álcool. Com isto pretendeu-se remover o pó resultante do processo de limagem, bem como, assegurar o desengorduramento das superfícies. O manuseamento dos substratos e *tabs* efetuou-se com cuidado para não contaminar as suas superfícies com gordura. A gordura tem baixa energia superficial, pelo que, dificulta o processo de aderência do adesivo. De seguida, aplicou-se por três vezes o agente desmoldante *HP7* na superfície de um dos *gabarits*, de forma a facilitar, posteriormente, a extração dos provetes. A etapa final corresponde a aplicação do adesivo. Através dos *gabarits* fabricados, controlou-se o alinhamento e área de sobreposição dos substratos, assim como, a espessura de adesivo. A espessura de adesivo pretendida de 0,5 mm foi conseguida a partir da diferença de espessuras entre os substratos inferiores (≈ 3 mm) e o *gabarit* (3,5 mm). Uma pistola pneumática constituída por dois reservatórios, um de resina e outro de catalisador, permitiu extrair o conteúdo destes nas devidas proporções.

Com o auxílio de uma espátula espalhou-se manualmente o adesivo, na área de sobreposição dos substratos e ainda na superfície dos *tabs*. Posto isto, procedeu-se à inserção dos substratos e *tabs* com adesivo no *gabarit* inferior. Por fim, posicionou-se o *gabarit* superior ao contrário, relativamente ao *gabarit* inferior e introduziu-se os restantes substratos e *tabs* (ver Figura 47).



Figura 47: Colagem dos substratos e *tabs*.

O processo de cura durou dois dias e decorreu à temperatura ambiente. Após a colagem, os provetes foram retirados dos *gabarits*, tal como mostra a Figura 48.

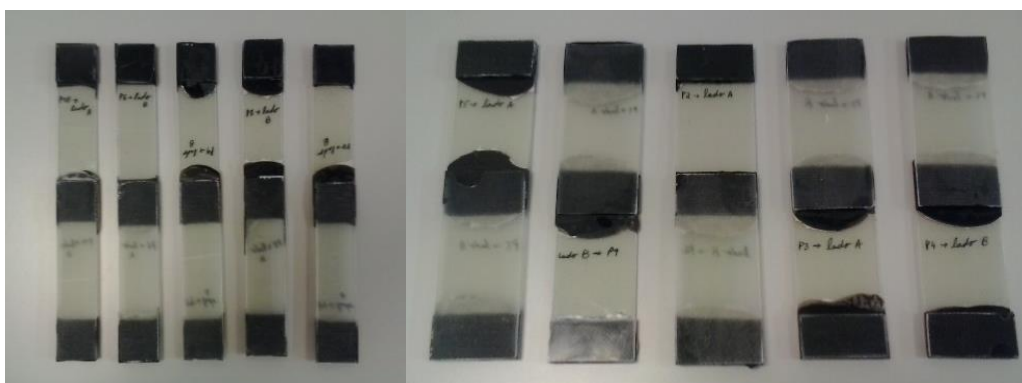


Figura 48: Aspeto final dos provetes, após a cura do adesivo.

De modo a facilitar a compreensão do trabalho executado, foram dadas denominações para identificar os provetes. A Tabela 16 apresenta não só a denominação de cada provete, como também a espessura média dos seus substratos e do adesivo.

Tabela 16: Espessura média dos substratos de fibra de vidro/epóxico, bem como, a espessura do adesivo.

Designação das juntas adesivas	Espessura dos substratos [mm]	Espessura da zona de sobreposição [mm]	Espessura do adesivo [mm]
P1	2,94 ± 0,01	6,41 ± 0,13	0,53
P2	2,90 ± 0,02	6,43 ± 0,17	0,63
P3	2,88 ± 0,02	6,76 ± 0,05	1,00
P4	2,95 ± 0,02	6,73 ± 0,04	0,83
P5	2,98 ± 0,05	6,35 ± 0,14	0,39
P6	2,96 ± 0,04	6,62 ± 0,06	0,70
P7	2,94 ± 0,02	6,43 ± 0,17	0,55
P8	2,95 ± 0,04	6,62 ± 0,05	0,72
P9	2,92 ± 0,01	6,36 ± 0,04	0,52
P10	2,94 ± 0,03	6,24 ± 0,03	0,36

3.7.5. Ensaio de tração

No presente trabalho foram preparadas juntas adesivas de sobreposição simples, para serem sujeitas a ensaios de tração. O ensaio de tração baseia-se na aplicação de um deslocamento a velocidade constante, nas extremidades de um provete, sendo simultaneamente medida a força necessária para deformar a amostra até à rotura.

Condições experimentais

O ensaio de tração em juntas adesivas de sobreposição simples foi realizado na máquina de ensaio de tração, instalada no laboratório de ensaios mecânicos do PIEP - Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros. A máquina usada foi o equipamento de ensaios *MTS Criterion® Model 45*, tal como se pode observar na Figura 49.



Figura 49: Dispositivo de ensaio de tração *MTS Criterion® Model 45*.

Com base nas normas ASTM D3163 – 01 (2014) e ASTM D1002 – 10, prepararam-se dez juntas adesivas de sobreposição simples, constituídas por substratos de fibra de vidro/epóxico, unidos através de um adesivo estrutural de epóxico. De um total de dez provetes produzidos, cinco possuíam uma área de sobreposição de $25 \times 25,5 \text{ mm}^2$, enquanto os restantes uma área de $50 \times 25,5 \text{ mm}^2$. A espessura do adesivo variou entre 0,36 mm e 1 mm. As juntas adesivas com área de sobreposição de $50 \times 25,5 \text{ mm}^2$ foram submetidas a níveis de carga entre 8,31 kN e 12,37 kN. As juntas de área de sobreposição de $25 \times 25,5 \text{ mm}^2$ foram sujeitas a um intervalo de forças de carregamento entre 3 kN e 6,21 kN. Após os ensaios de tração, as juntas foram analisadas por UT, de modo a caracterizar o dano que estas sofreram.

3.8. Ensaios não destrutivos

3.8.1. Ultrassons

No presente trabalho foi utilizada a técnica de END por ultrassons, para avaliar e caracterizar defeitos induzidos em laminados em material compósito. De seguida, é efetuada uma descrição sobre o equipamento de UT e o procedimento adotado na inspeção das várias amostras.

3.8.2. Equipamento de ensaio

Para a análise UT dos vários laminados produzidos por VARI, foi usada a técnica de reflexão (*Pulse echo*), recorrendo-se ao equipamento portátil *Prisma* do tipo *A-Scan* da *Sonatest* (ver Figura 50). Este equipamento suporta um número máximo de 64 elementos e possui a capacidade para operar em três modos: ultrassom convencional, *Phased Array* e TOFD (*Time of Flight Diffraction*).

No presente trabalho, os laminados em material compósito foram inspecionados no modo *Phased Array*. O *Prisma* permite combinar a visualização de vários tipos de representações como o *A-Scan*, *B-Scan* e *C-Scan*, durante um ensaio. Neste trabalho usou-se uma sonda *Phased Array* plana constituída por 64 elementos e de frequência 5 MHz.

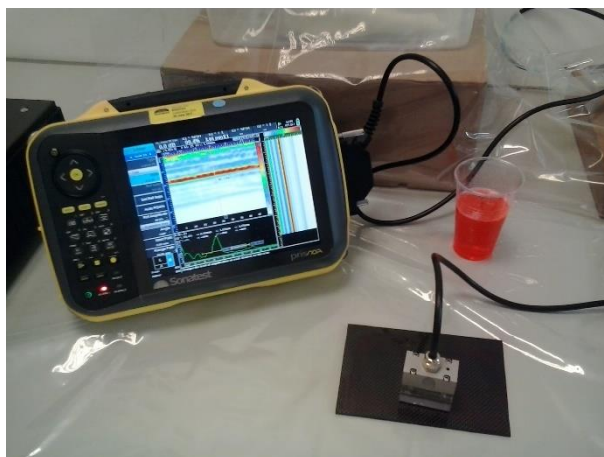


Figura 50: Equipamento *Prisma* do tipo *A-Scan* da *Sonatest*.

3.8.3. Procedimento experimental adotado na inspeção das amostras

Antes da inspeção de cada amostra, foi necessária a configuração e a calibração do equipamento. A configuração do aparelho consistiu na definição de parâmetros como o tipo de inspeção, as características da amostra a analisar (geometria, espessura e material), e ainda, a configuração da sonda. Em relação à calibração do aparelho, esta incluiu a velocidade das ondas de ultrassom, ganho, sensibilidade, entre outros. De seguida, foi necessário o uso de um acoplante à base de água, entre a sonda e a amostra a analisar, pois a técnica de reflexão é um método de inspeção de contacto. Posto isto, foram efetuados varrimentos com a sonda, das áreas de maior interesse de cada amostra, sendo os dados obtidos armazenados pelo aparelho. Para a análise e tratamento dos dados obtidos, recorreu-se ao *software UTSTUDIO*.

4. Resultados e discussão

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais relativos à análise UT de furações, corpos estranhos, danos mecânicos e juntas adesivas. De referir que, os resultados obtidos a partir da técnica UT são apresentados neste trabalho, segundo o formato da Figura 166 do Anexo D.

4.1. Caracterização do dano na furação de laminados de fibra de vidro/epóxico

4.1.1. Análise do laminado constituído por furos não passantes

Após a operação de furação, a avaliação do dano na furação da placa constituída por furos não passantes, foi efetuada com recurso à inspeção visual e à técnica de ultrassons. A Figura 51 ilustra a superfície frontal e oposta do laminado.



Figura 51: Laminado F_1 com furos não passantes de diâmetros distintos - (a) superfície frontal da placa; (b) face oposta da placa.

Como o laminado F_1 é de fibra de vidro/epóxico e, portanto, um material compósito translúcido, na sua face oposta é possível visualizar em torno de alguns furos maquinados, uma orla circular esbranquiçada, tal como mostra a Figura 52.

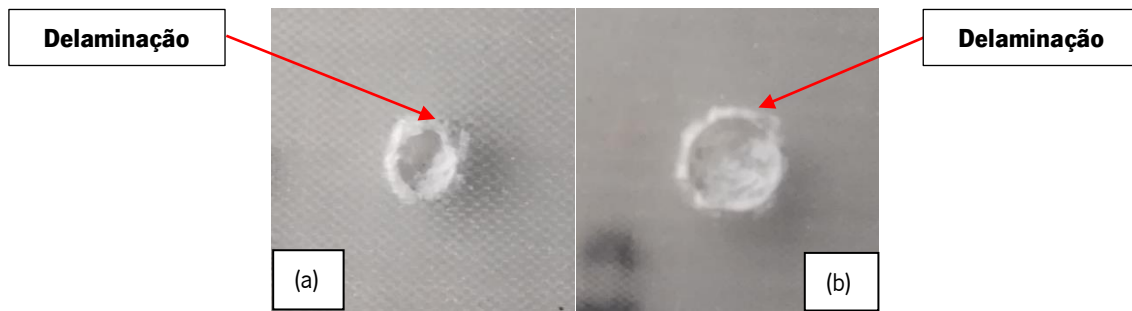


Figura 52: Delaminação à entrada dos furos, resultante da operação de furação - (a) furo C4 de diâmetro 2,5 mm; (b) furo C8 de diâmetro 4,5 mm.

Este dano é denominado de delaminação à entrada do furo e resultou do facto de no início do corte, a hélice da broca ter puxado o material, promovendo a rotura das ligações entre as lâminas superiores. De modo a avaliar a extensão da delaminação à entrada dos furos não passantes, recorreu-se a um microscópio ótico e a uma régua. Após a identificação da maior diagonal da zona delaminada de cada furo, efetuou-se a medição dos diâmetros e aplicou-se o critério do fator de delaminação (F_d), de acordo com a definição dada por *Chen* [32]:

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D} \quad (10)$$

Onde:

- F_d corresponde ao fator de delaminação;
- D_{\max} representa o maior diâmetro da zona delaminada (mm);
- D é o diâmetro nominal do furo (mm) [32].

A variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca é apresentada na Figura 53 e na Tabela 42 do Anexo E.

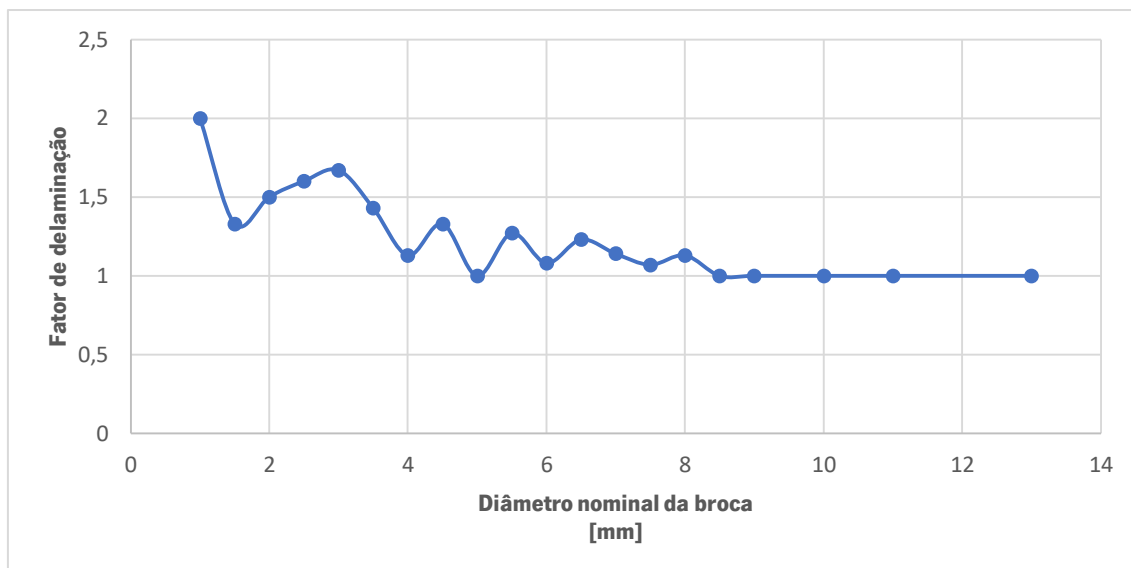


Figura 53: Variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca.

Os resultados apresentados na Figura 53 permitem dizer que, existe uma tendência para a diminuição da extensão da região delaminada com o aumento do diâmetro da broca.

Análise por ultrassons

Pretendeu-se com este trabalho verificar a detetabilidade do dano induzido por furação, através do método de ultrassons. Na análise UT dos furos maquinados, foi utilizada uma frequência de 5 MHz e um ganho de 5 dB. De referir que essa análise, foi realizada pelo lado da placa, que esteve em contacto com o molde de vidro, durante o processo de produção VARI. Na Tabela 17 são indicadas as velocidades de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais, no laminado F_1.

Tabela 17: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais no laminado F_1.

Velocidade de propagação das ondas sonoras longitudinais [mm/μs]	Velocidade de propagação das ondas sonoras transversais [mm/μs]
2,912	1,950

Nas Figuras 54 (b) a 64 (b) são apresentados os *scans* relativos à análise UT dos furos não passantes maquinados na placa F_1, sob a forma de *A-Scan* e *L-Scan*.

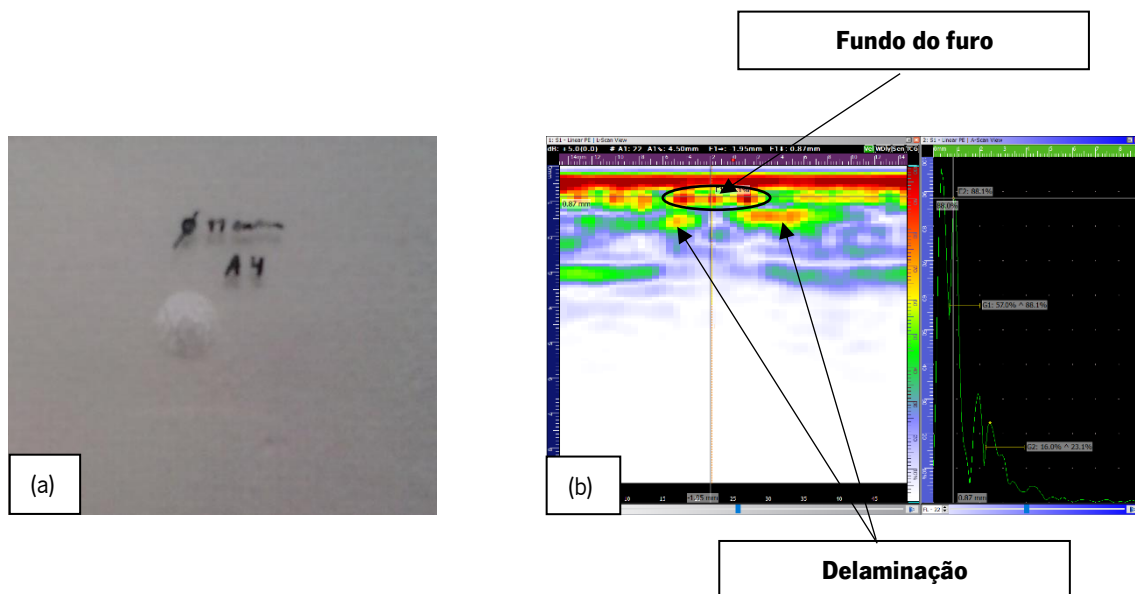


Figura 54: (a) Furo A4 de diâmetro 11 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo A4.

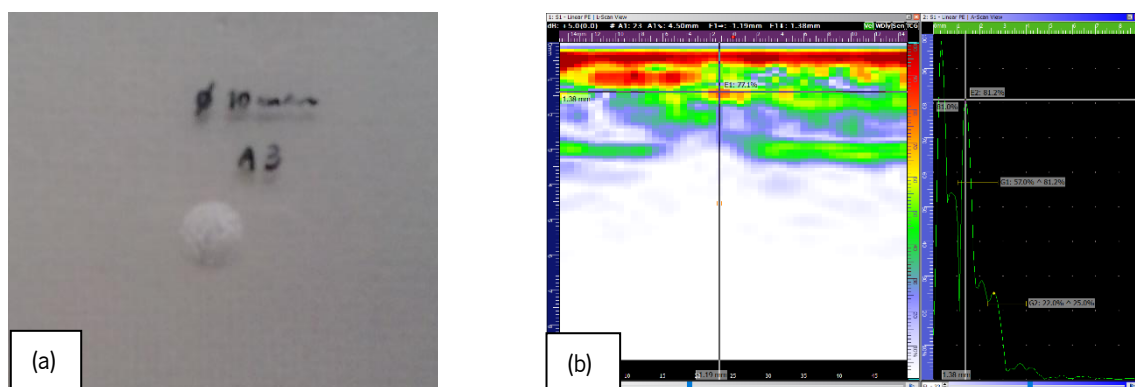


Figura 55: (a) Furo A3 de diâmetro 10 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo A3.

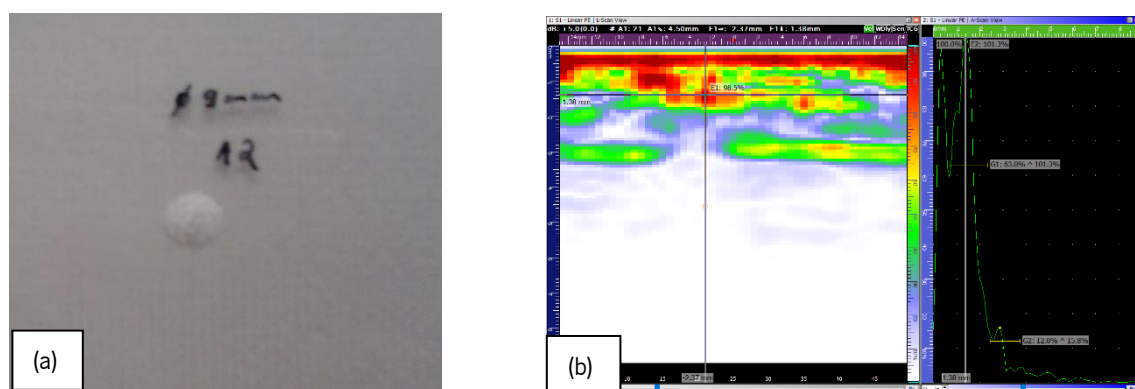


Figura 56: (a) Furo A2 de diâmetro 9 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo A2.

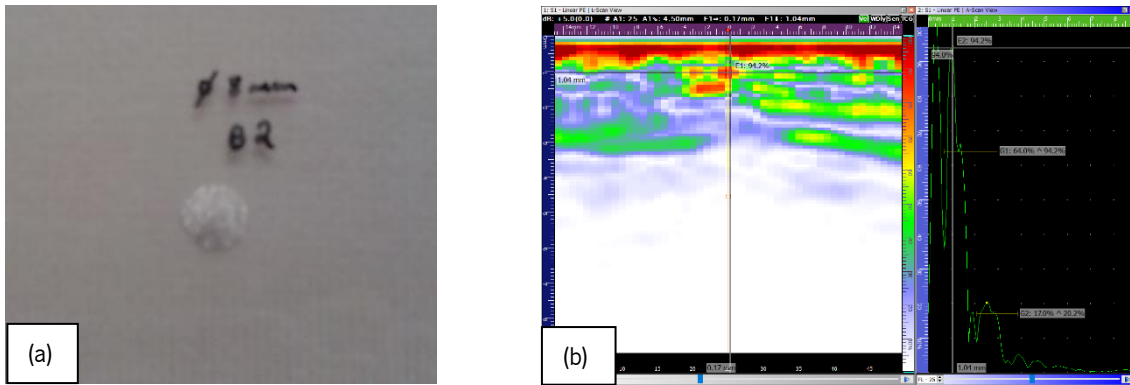


Figura 57: (a) Furo B2 de diâmetro 8 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo B2.

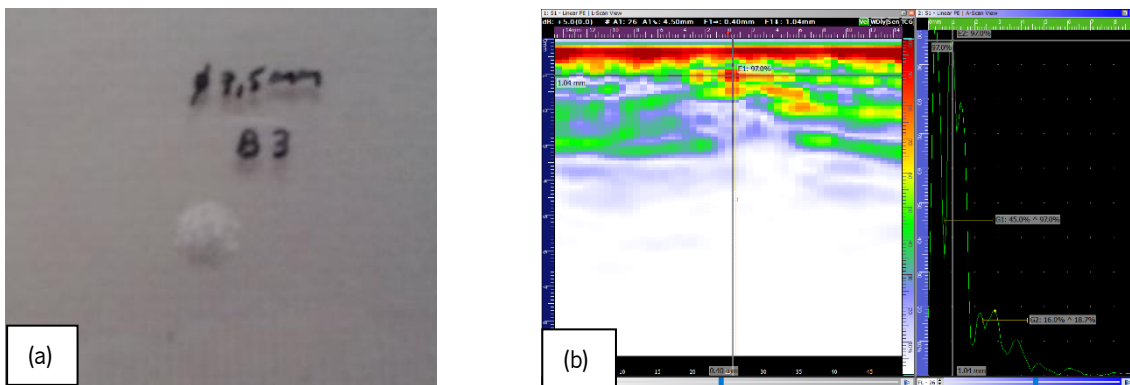


Figura 58: (a) Furo B3 de diâmetro 7,5 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo B3.

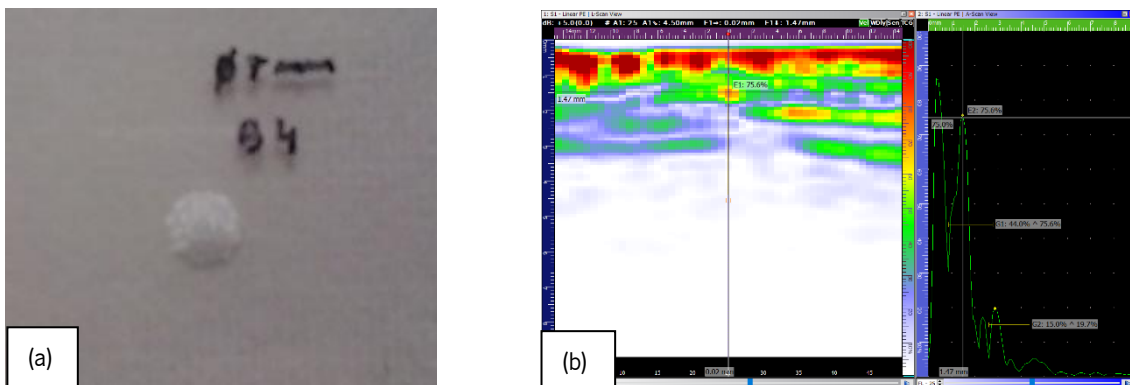


Figura 59: (a) Furo B4 de diâmetro 7 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo B4.

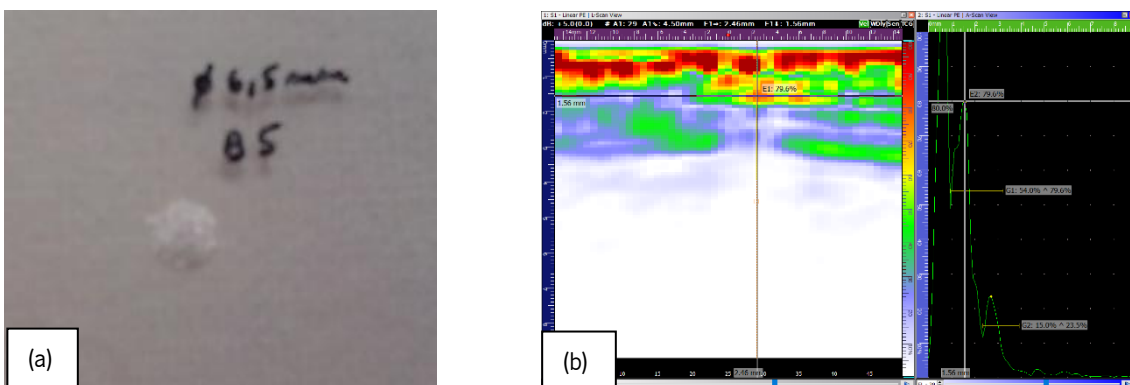


Figura 60: (a) Furo B5 de diâmetro 6,5 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo B5.

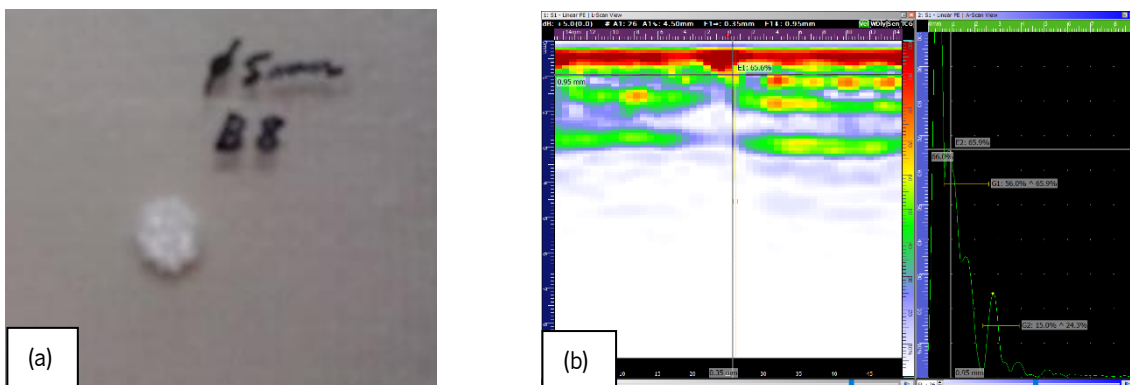


Figura 61: (a) Furo B8 de diâmetro 5 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo B8.

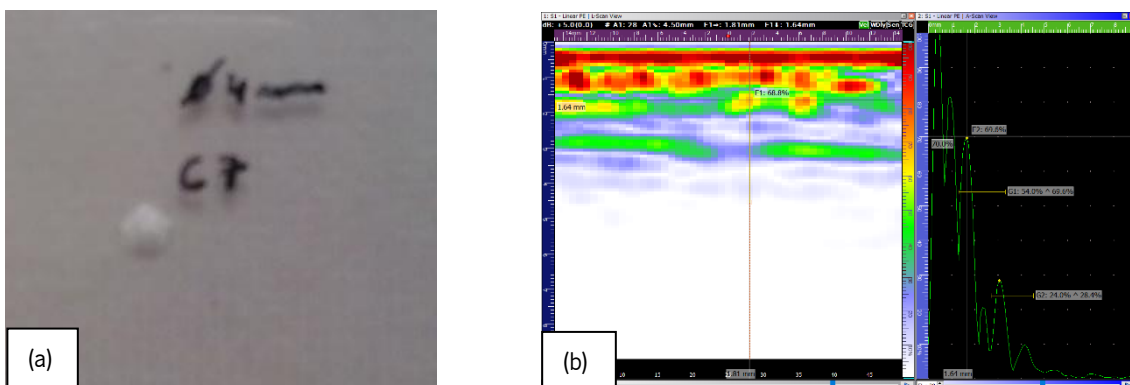


Figura 62: (a) Furo C7 de diâmetro 4 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo C7.

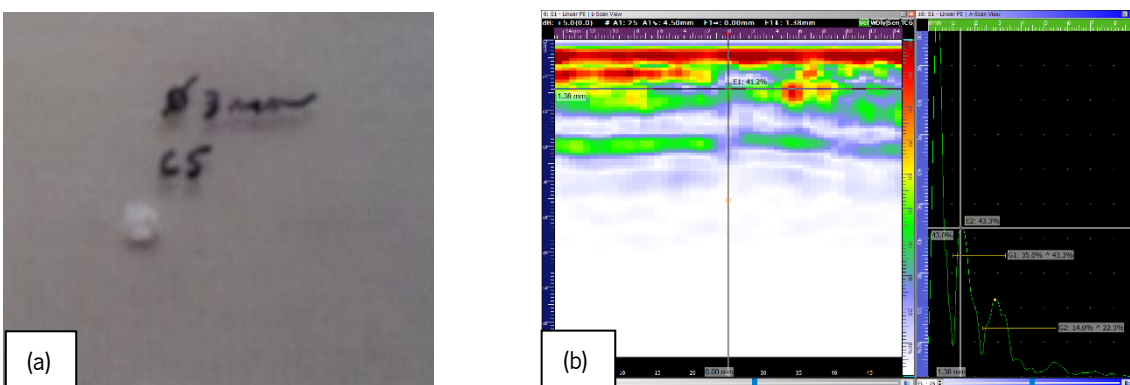


Figura 63: (a) Furo C5 de diâmetro 3 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo C5.

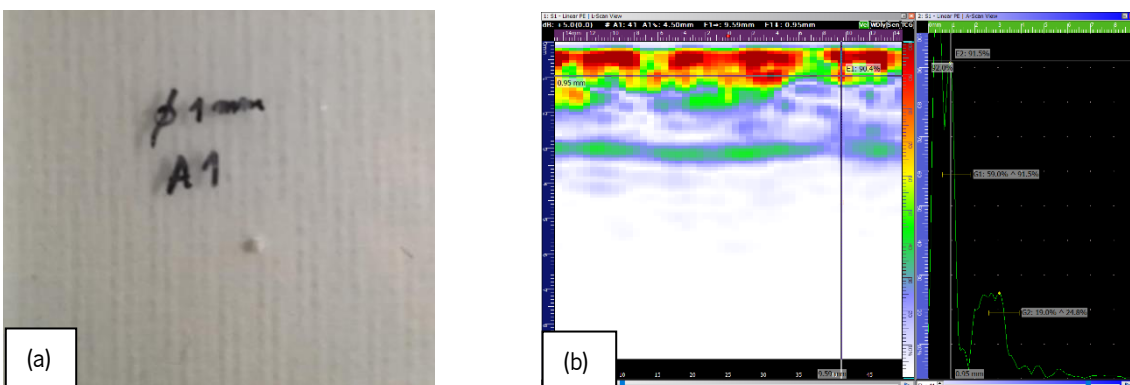


Figura 64: a) Furo A1 de diâmetro 1 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo A1.

Conforme se pode observar nas representações *A-Scan* e *L-Scan* das Figuras 54 (b) a 64 (b), a presença de um furo não passante é detetada, porque a sua execução originou uma descontinuidade no material (no fundo), deixando a superfície oposta do laminado de ser visível, na zona onde se localiza esse mesmo furo. Sempre que exista um furo não passante, este origina a reflexão das ondas de ultrassom verificando-se, praticamente, a inexistência de sinal do fundo do laminado.

Na vista *L-Scan* das Figuras 54 (b), 57 (b) a 59 (b) e 61 (b), também é perceptível a existência do dano de delaminação, sendo este restrito à região circundante de cada furo, como sugerem as zonas refletoras das ondas sonoras. Este modo de dano está associado ao efeito compressivo exercido pela broca sobre as camadas do laminado, resultando na sua separação [32].

A sonda *Phased Array* de frequência 5 MHz conseguiu detetar furos de pequenas dimensões, sendo o menor furo detetado de diâmetro 1 mm. Contudo, notou-se uma dificuldade crescente para localizar as furações, à medida que o diâmetro destas diminuía, pois tornavam-se mais difíceis de observar na vista *L-Scan*. Isso contribuiu para a não localização de alguns furos como o A6 (diâmetro 1 mm), C1 (diâmetro 1 mm), C2 (diâmetro 1,5 mm), C3 (diâmetro 2 mm), C4 (diâmetro 2,5 mm) e C6 (diâmetro 3,5 mm).

Através da técnica de ultrassons foi possível determinar a profundidade dos furos maquinados. Para isso, determinou-se a diferença entre a espessura total do laminado F_1 ($\approx 2,98$ mm) e a profundidade de cada descontinuidade no material, que causou a reflexão das ondas sonoras, dada pelas vistas *A-Scan* e *L-Scan*. Por exemplo, para o cálculo da profundidade do furo B5 (ver Figura 65), subtraiu-se 2,98 mm a 1,56 mm, que é a profundidade da descontinuidade originada por este furo, dada por *A-Scan* e *L-Scan*.

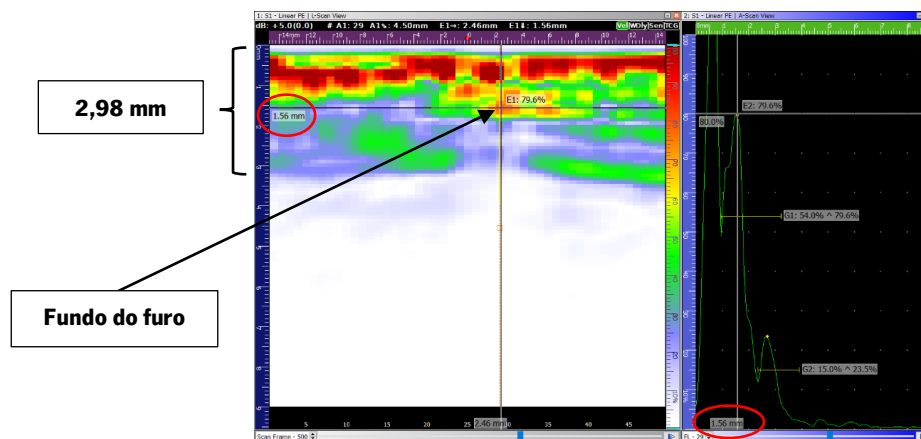


Figura 65: *L-Scan* e *A-Scan* do furo B5 de diâmetro 6,5 mm.

Na Tabela 18 são indicadas as profundidades determinadas para cada furo não passante.

Tabela 18: Profundidade de cada furo maquinado dada por ultrassons.

Designações dos furos	Diâmetro nominal da broca	Profundidade do reflexo relativo ao fundo do furo	Profundidade do furo
	[mm]	[mm]	[mm]
A1	1,00	0,95	2,03
A2	9,00	1,38	1,60
A3	10,00	1,38	1,60
A4	11,00	0,87	2,11
B1	8,50	1,56	1,42
B2	8,00	1,04	1,94
B3	7,50	1,04	1,94
B4	7,00	1,47	1,51
B5	6,50	1,56	1,42
B6	6,00	1,56	1,42
B7	5,50	0,87	2,11
B8	5,00	0,95	2,03
C5	3,00	1,38	1,60
C7	4,00	1,64	1,34
C8	4,50	0,95	2,03
C9	1,00	0,87	2,11

A Tabela 18 mostra que, o equipamento de ultrassons utilizado neste trabalho experimental, foi capaz de detetar furos de diâmetro 1 mm com uma profundidade superior a 2 mm. Também foi possível determinar por UT, o diâmetro das furações. Para a obtenção do diâmetro, que é medido na direção horizontal, recorreu-se a dois eixos verticais da representação *L-Scan*, para definir o limite de cada furo. Considerou-se que, o diâmetro de uma furação seria a distância máxima entre dois eixos verticais, posicionados no limite de detetabilidade do sinal do fundo do laminado. Por exemplo, a Figura 66 mostra a secção transversal do furo B1. Verifica-se que o diâmetro determinado para este furo foi de 7,33 mm ($\varnothing_{B1} = 3,96 + 3,37 = 7,33$ mm).

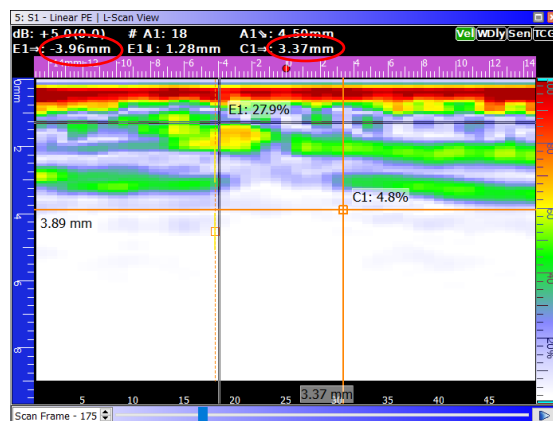


Figura 66: Obtenção do diâmetro do furo B1.

A Tabela 19 apresenta uma comparação entre os diâmetros determinados por ultrassons e os diâmetros nominais da broca.

Tabela 19: Diâmetros estimados por ultrassons e diâmetros nominais da broca.

Denominações dos furos	Diâmetro nominal da broca [mm]	Diâmetro dado por UT [mm]	Erro [%]
A4	11	9,71	-11,7*
A3	10	9,05	-9,5
A2	9	6,00	-33,3
B1	8,5	7,33	- 13,8
B2	8	7,85	- 1,9
B3	7,5	7,29	-2,8
B4	7	7,73	10,4
B5	6,5	5,99	- 7,8
B6	6	6,03	0,5
B7	5,5	5,89	7,1
B8	5	5,37	7,4
C8	4,5	4,86	8
C7	4	4,21	5,3
C5	3	2,98	-0,7
C9	1	1,16	16
A1	1	1,66	66

* O sinal negativo indica subdimensionamento por parte da técnica de UT.

Os resultados apresentados na Tabela 19 permitem dizer que, não se verifica a existência de uma relação entre o erro associado à medição por ultrassons e o tamanho dos furos.

4.1.2. Análise do laminado constituído por furos passantes

A análise do dano na furação do laminado constituído por furos passantes baseou-se na realização de ensaios não destrutivos, por inspeção visual e ultrassons. A Figura 67 mostra a superfície frontal e oposta desta placa.

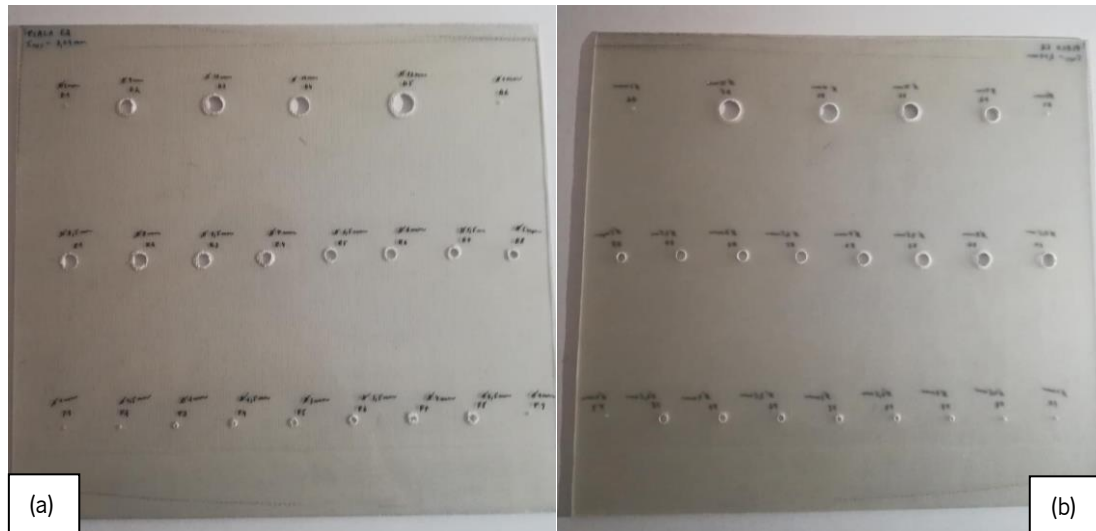


Figura 67: Laminado F_2 com furos passantes de diâmetros distintos – (a) face frontal da placa; (b) face oposta da placa.

Na face frontal e oposta do laminado F_2 é visível um dos tipos de dano mais frequentes, que podem resultar da operação de furação: a delaminação. Este dano surgiu na orla à volta dos furos maquinados, e nos lados correspondentes à entrada e saída da broca, tal como mostra a Figura 68.

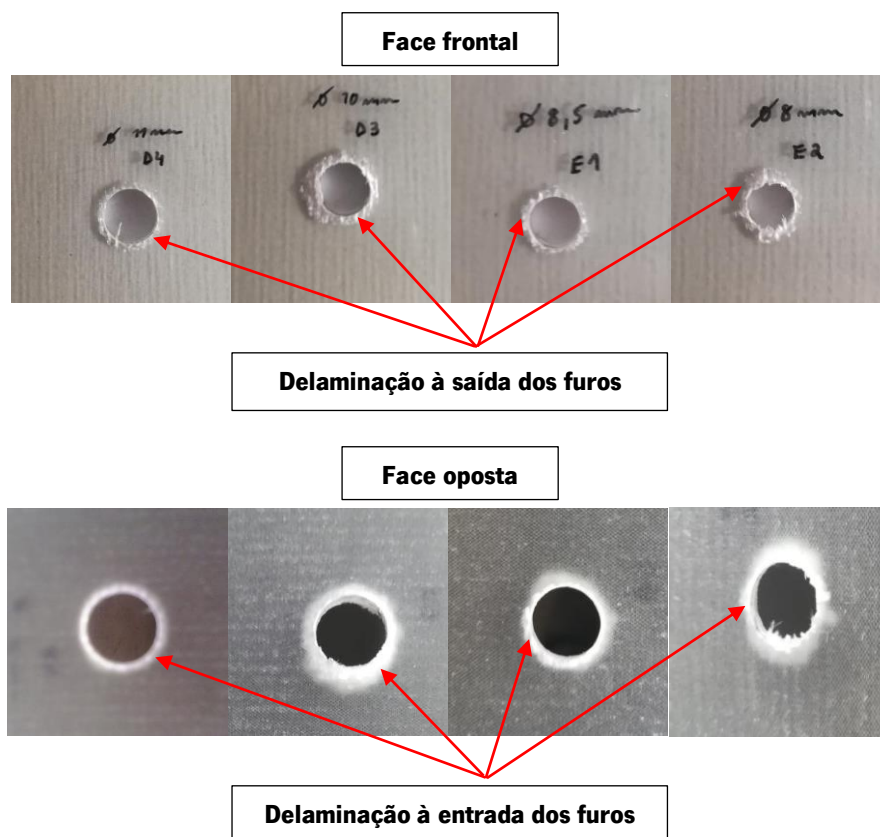


Figura 68: Delaminação à saída e à entrada dos furos D4 (diâmetro 11 mm), D3 (diâmetro 10 mm), E1 (diâmetro 8,5 mm) e E2 (diâmetro 8 mm), do lado esquerdo para o lado direito da figura.

A delaminação à entrada do furo resultou do facto de no início da furação, a broca ter promovido o arrancamento das lâminas superiores do laminado. A delaminação à saída do furo, por sua vez, foi provocada pelo efeito compressivo efetuado pela broca sobre as lâminas inferiores [32]. Com o recurso a um microscópio ótico e a uma régua, realizou-se a quantificação do dano de delaminação à volta de cada furo passante, utilizando o mesmo método aplicado na análise do laminado constituído por furos não passantes. A variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca é apresentada na Figura 69 e na Tabela 43 do Anexo F.

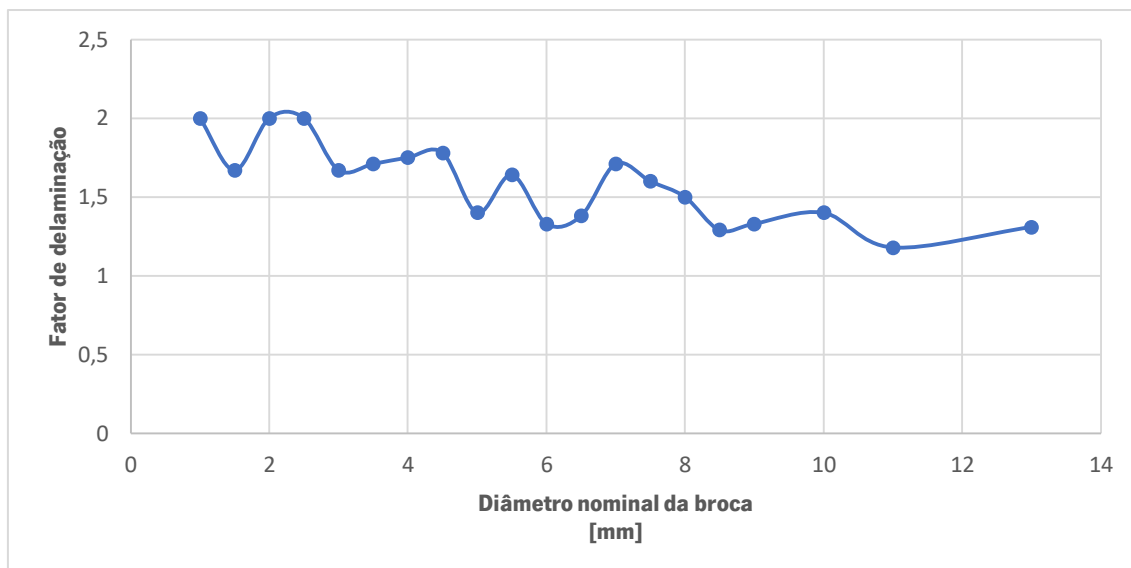


Figura 69: Variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca.

Verifica-se na Figura 69 uma ligeira tendência para a diminuição da extensão da delaminação com o aumento do diâmetro da broca.

Análise por ultrassons

Na análise UT dos furos maquinados, foi utilizada uma frequência de 5 MHz e um ganho de 5 dB. Na Tabela 20 são apresentadas as velocidades de propagação obtidas para as ondas de ultrassom longitudinais e transversais, no laminado F_2.

Tabela 20: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais no laminado F_2.

Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais [mm/μs]	Velocidade de propagação das ondas de ultrassom transversais [mm/μs]
2,912	1,950

Nas Figuras 70 (b) a 75 (b) são apresentados os resultados relativos à análise UT dos furos passantes maquinados na placa F_2, sob a forma de *L-Scan* e *A-Scan*.

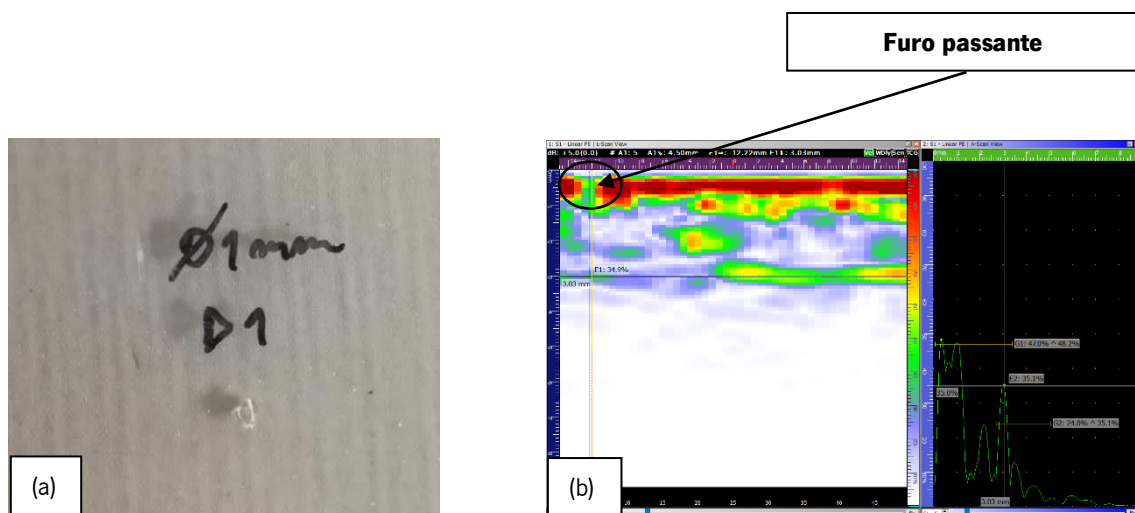


Figura 70: (a) Furo D1 de diâmetro 1 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo D1.

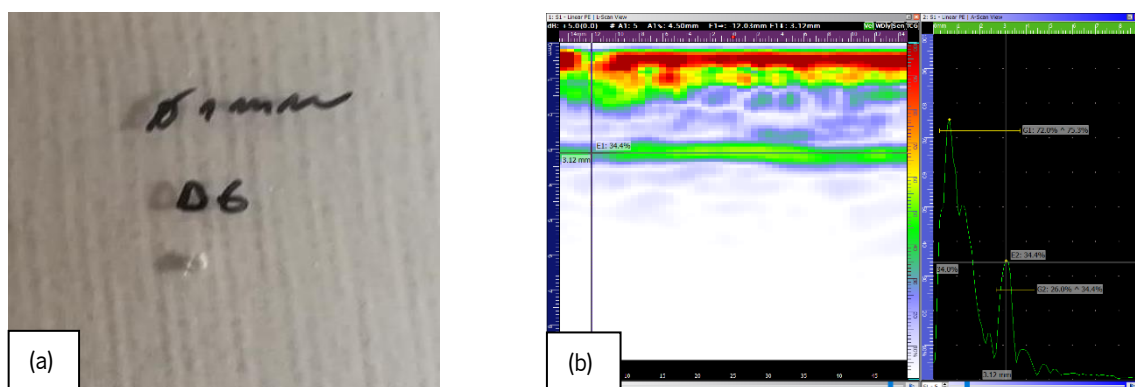


Figura 71: (a) Furo D6 de diâmetro 1 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo D6.

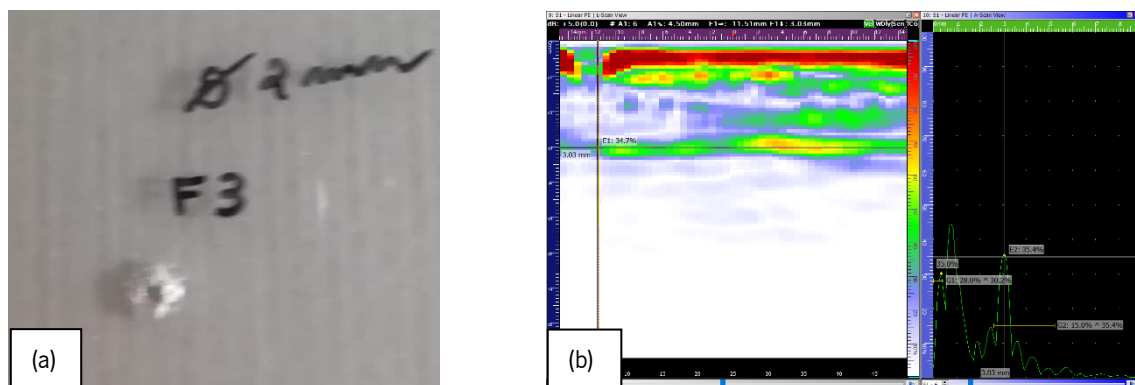


Figura 72: (a) Furo F3 de diâmetro 2 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo F3.

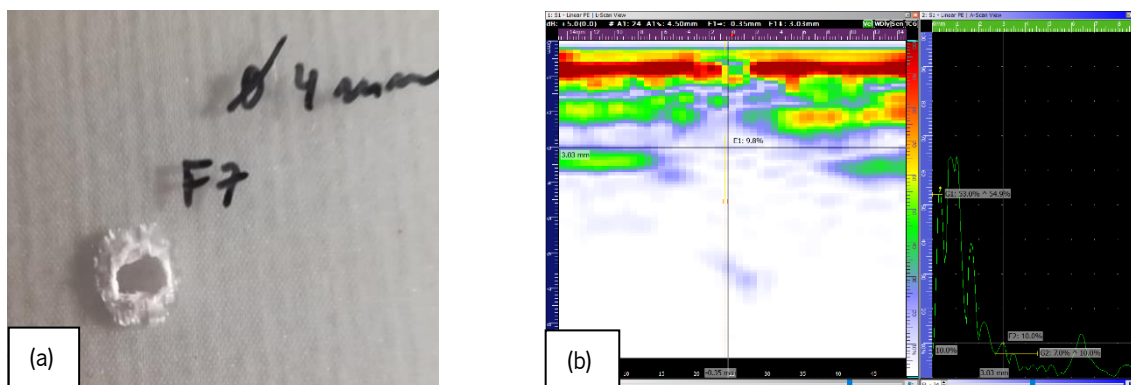


Figura 73: (a) Furo F7 de diâmetro 4 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo F7.

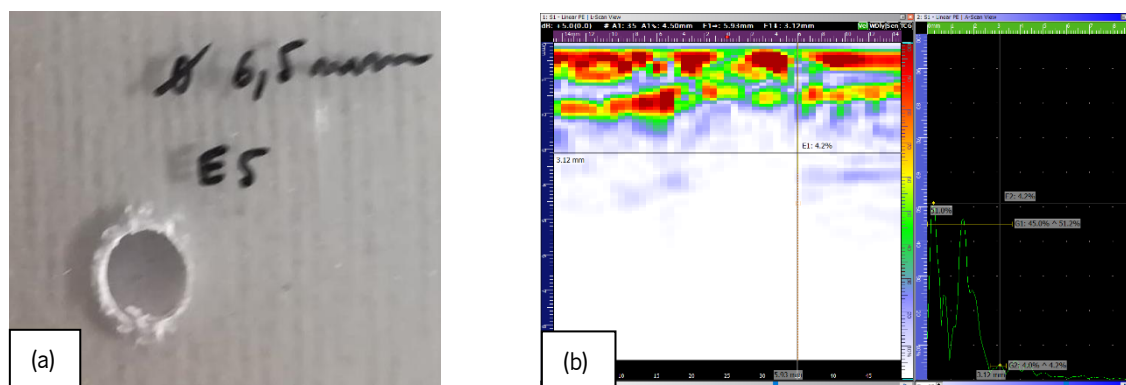


Figura 74: (a) Furo E5 de diâmetro 6,5 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo E5.

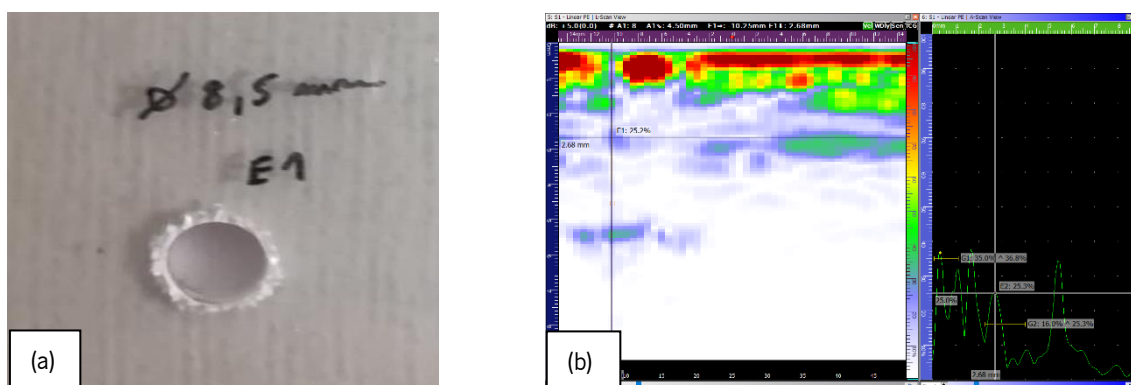


Figura 75: (a) Furo E1 de diâmetro 8,5 mm; (b) *L-Scan* e *A-Scan* do furo E1.

Como a análise UT foi realizada pelo lado do laminado correspondente à saída da broca, houve a necessidade do levantamento da sonda durante o varrimento dos furos, devido à existência de material que se separou das camadas do laminado durante o processo de furação (delaminação à saída). Consequentemente obtiveram-se *scans* de fraca qualidade, pois ocorreu uma má transmissão das ondas de ultrassom. Assim, apenas se colocaram nesta secção os melhores *scans*.

Conforme se pode observar nas representações *A-Scan* e *L-Scan* das Figuras 70 (b) a 75 (b), a presença de um furo passante é assinalada pela inexistência do reflexo da superfície e do fundo do laminado, na zona onde se localiza esse mesmo furo. Isto aconteceu porque, nas zonas onde se situam os furos, as ondas de ultrassom deixam de ter um meio físico para se propagarem.

Não é perceptível na representação *L-Scan* das Figuras 70 (b) a 75 (b), a existência do dano de delaminação, observado durante a inspeção visual. Para isto terá contribuído, certamente, o deficiente controlo da sonda durante a realização da inspeção.

O dispositivo de UT teve a capacidade para detetar furos de pequenas dimensões, sendo o menor furo detetado de diâmetro 1 mm. A partir da representação *L-Scan* foi possível estimar o diâmetro dos furos maquinados. Para isso, usou-se um método similar ao aplicado na análise do laminado constituído por furos não passantes. O diâmetro das furações foi medido na direção horizontal, com recurso a dois eixos verticais da representação *L-Scan*, para definir o limite de cada furo. Considerou-se que, o diâmetro de uma furação seria a distância máxima entre dois eixos verticais, colocados no limite de detetabilidade do sinal da superfície do laminado. Por exemplo, a Figura 76 mostra a secção transversal do furo D1. Verifica-se que o diâmetro obtido para este furo foi de 1,17 mm ($\varnothing_{D1} = 12,88 - 11,71 = 1,17$ mm).

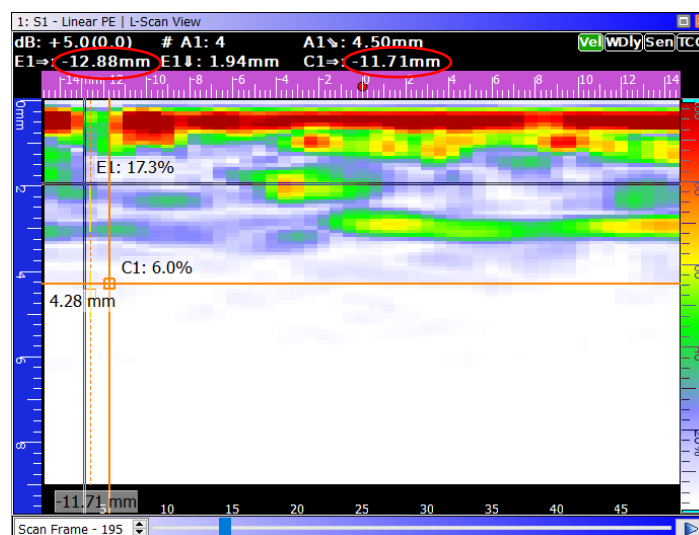


Figura 76: Obtenção do diâmetro do furo D1.

Na Tabela 21 faz-se uma comparação entre os diâmetros obtidos por UT e os diâmetros nominais da broca.

Tabela 21: Diâmetro de cada furo maquinado dado por UT.

Designações dos furos	Diâmetro nominal da broca	Diâmetro dado por UT	Erro
	[mm]	[mm]	[%]
E1	8,5	7,14	-16*
E3	7,5	7,15	-4,7
E5	6,5	6,56	0,9
F7	4	3,62	-9,5
F3	2	2,27	13,5
D1	1	1,17	17
D6	1	1,88	88
F9	1	1,11	11

Os resultados apresentados na Tabela 21 mostram que, não existe uma relação entre o erro associado à medição por ultrassons e o tamanho dos furos.

4.2. Caracterização por ultrassons do laminado fibra de vidro/epóxico contendo inclusões

A análise das inclusões inseridas no laminado C_1 foi realizada através da técnica de ultrassons. Foi utilizada uma sonda *Phased Array* de frequência 5 MHz, tendo a inspeção sido efetuada pelo lado da placa, que esteve em contacto com o molde de vidro, durante o processo de produção VARI. A Tabela 22 apresenta as velocidades de propagação obtidas para as ondas sonoras, durante o processo de calibração da sonda, para as cinco espessuras da placa C_1.

* O sinal negativo indica subdimensionamento por parte da técnica de ultrassons.

Tabela 22: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais no laminado C_1.

Zona do laminado	Espessura [mm]	Velocidade de propagação das ondas sonoras longitudinais [mm/μs]	Velocidade de propagação das ondas sonoras transversais [mm/μs]
S1	3,13 ± 0,05	3,134	1,950
S2	4,04 ± 0,07	3,134	1,950
S3	5,83 ± 0,07	3,134	1,950
S4	6,95 ± 0,04	3,019	1,950
S5	8,60 ± 0,11	3,019	1,950

Conforme se pode observar na Tabela 22, verificou-se que nas zonas S1, S2 e S3, as ondas de ultrassom longitudinais se propagaram a uma velocidade de 3,134 mm/μs, enquanto nas regiões S4 e S5, estas se deslocaram a uma velocidade de 3,019 mm/μs. Como a calibração efetuada para as áreas S1, S2 e S3, não era a mais adequada para as zonas S4 e S5, realizou-se uma nova calibração da sonda, que resultou nesta diferença de velocidades.

Pretendeu-se com este trabalho verificar, através do método de UT, a detetabilidade das inclusões inseridas, bem como, perceber o efeito que estas induzem no sinal de UT. De seguida, as Figuras 77 a 94 apresentam os resultados obtidos da análise UT, para as inclusões de *peel ply*, fita adesiva, PET/Al/PE, alumínio, filme de vácuo e *Teflon™*.

Inclusões de *peel ply*

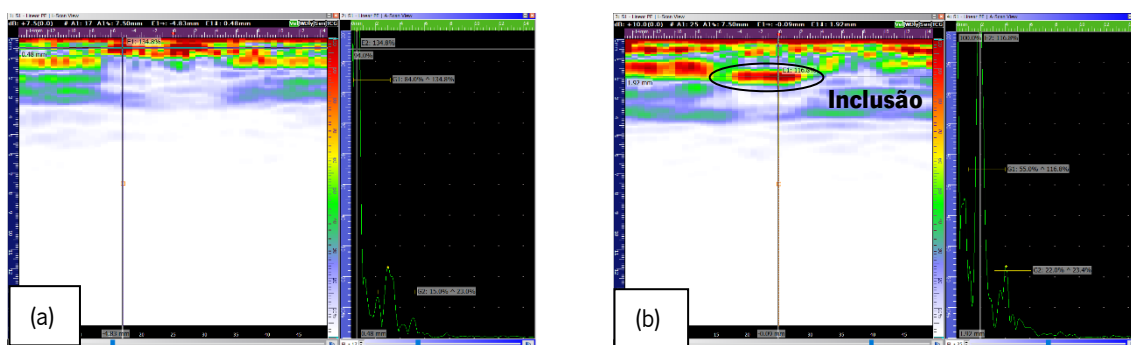


Figura 77: (a) Inclusão de *peel ply* de dimensões 10×10 mm² colocada na zona de espessura 3,13 mm; (b) inclusão de *peel ply* de dimensões 4×4 mm² colocada na zona de espessura 4,04 mm.

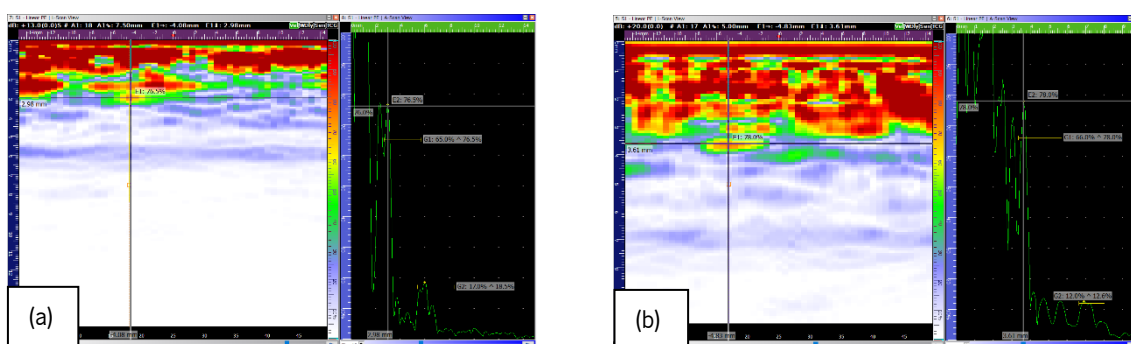


Figura 78: (a) Inclusão de *peel ply* de dimensões 3×3 mm² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de *peel ply* de dimensões 6×6 mm² colocada na zona de espessura 6,95 mm.

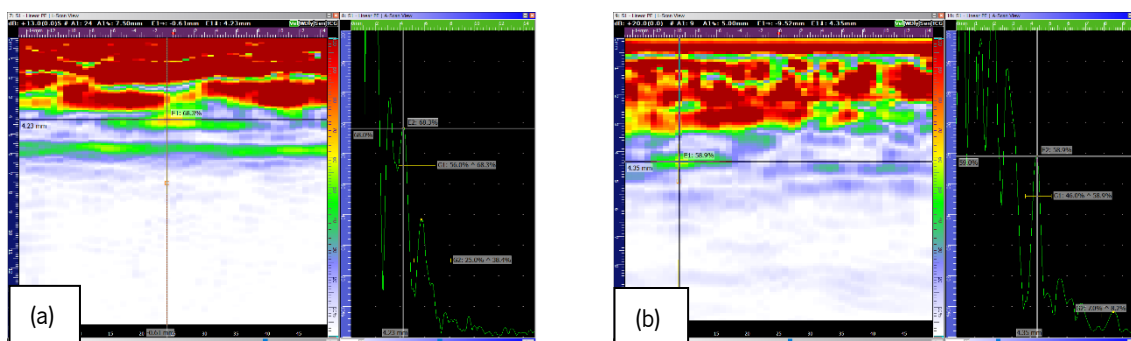


Figura 79: (a) Inclusão de *peel ply* de dimensões 5×5 mm² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de *peel ply* de dimensões 7×7 mm² colocada na zona de espessura 8,60 mm.

Inclusões de fita adesiva

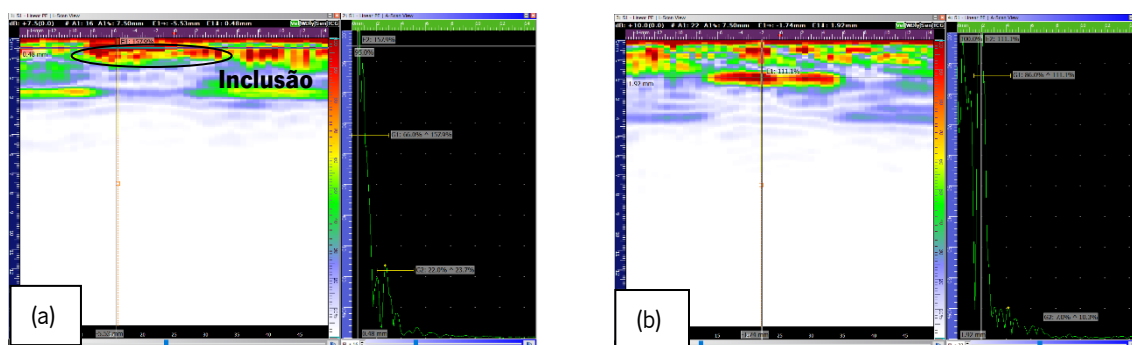


Figura 80: (a) Inclusão de fita adesiva de dimensões 8×8 mm² colocada na zona de espessura 3,13 mm; (b) inclusão de fita adesiva de dimensões 10×10 mm² colocada na zona de espessura 4,04 mm.

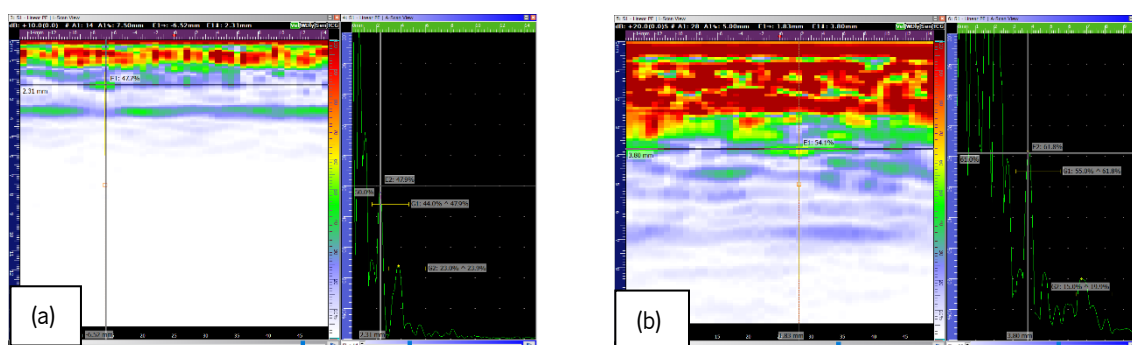


Figura 81: (a) Inclusão de fita adesiva de dimensões 3×3 mm² colocada na zona de espessura 4,04 mm; (b) inclusão de fita adesiva de dimensões 5×5 mm² colocada na zona de espessura 6,95 mm.

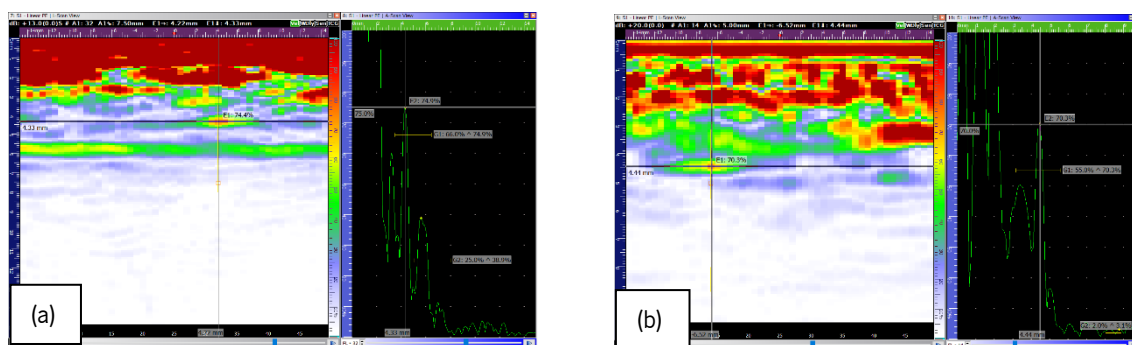


Figura 82: (a) Inclusão de fita adesiva de dimensões 4×4 mm² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de fita adesiva de dimensões 6×6 mm² colocada na zona de espessura 8,60 mm.

Inclusões de PET/Al/PE

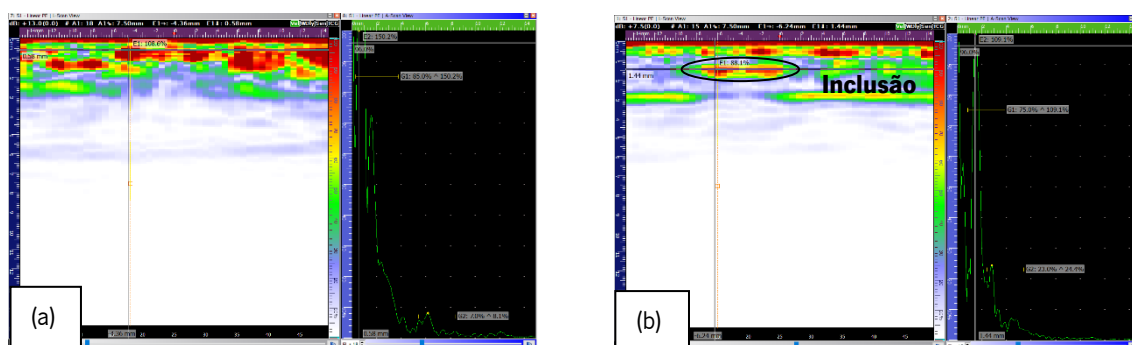


Figura 83: (a) Inclusão de PET/Al/PE de dimensões $10 \times 10 \text{ mm}^2$ colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de PET/Al/PE de dimensões $7 \times 7 \text{ mm}^2$ colocada na zona de espessura 3,13 mm.

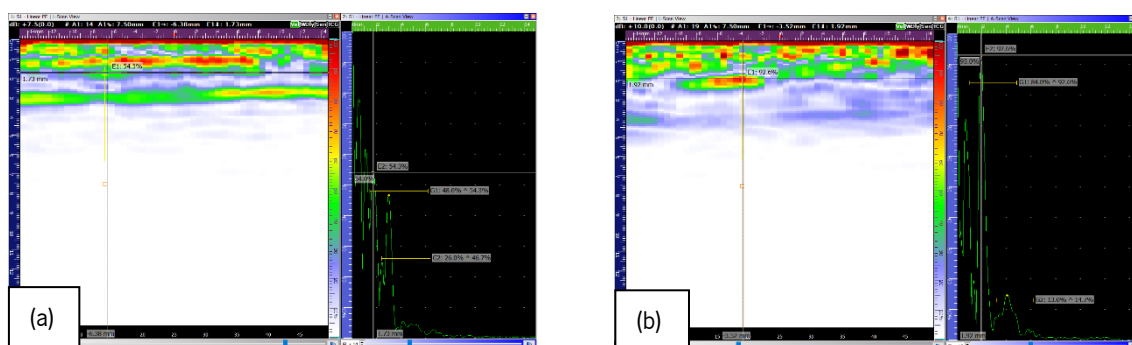


Figura 84: (a) Inclusão de PET/Al/PE de dimensões $3 \times 3 \text{ mm}^2$ colocada na zona de espessura 3,13 mm; (b) inclusão de PET/Al/PE de dimensões $8 \times 8 \text{ mm}^2$ colocada na zona de espessura 4,04 mm.

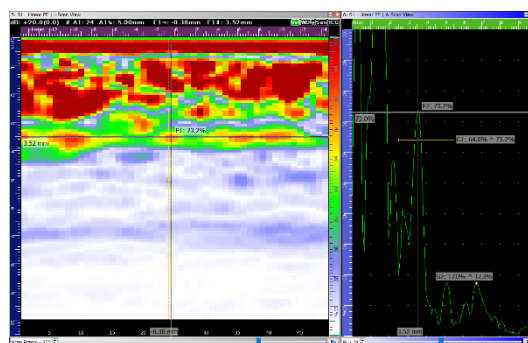


Figura 85: Inclusão de PET/Al/PE de dimensões $4 \times 4 \text{ mm}^2$ colocada na zona de espessura 6,95 mm.

Inclusões de alumínio

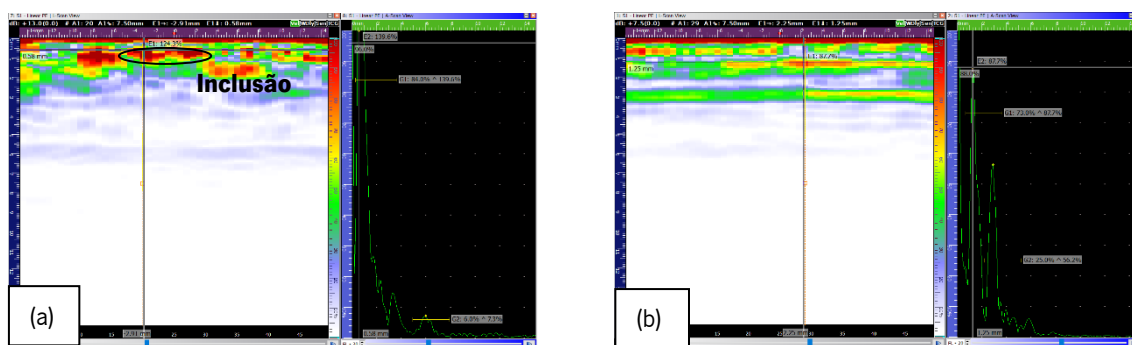


Figura 86: (a) Inclusão de alumínio de dimensões 8×8 mm² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de alumínio de dimensões 6×6 mm² colocada na zona de espessura 3,13 mm.

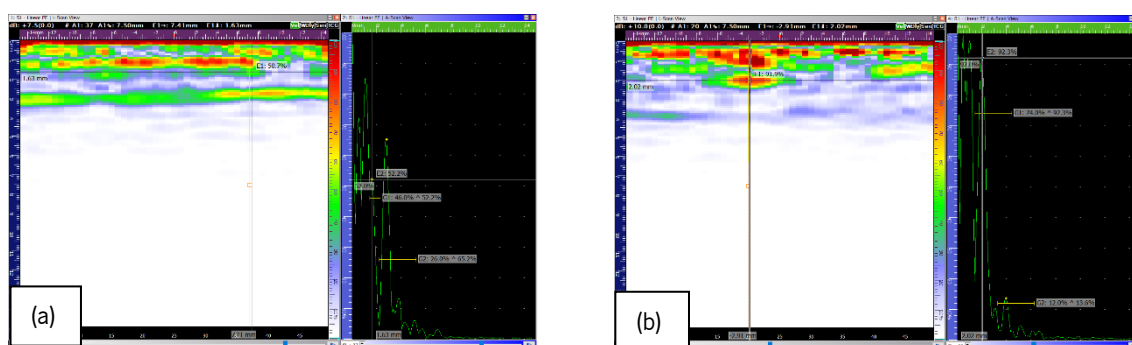


Figura 87: (a) Inclusão de alumínio de dimensões 3×3 mm² colocada na zona de espessura 3,13 mm; (b) inclusão de alumínio de dimensões 7×7 mm² colocada na zona de espessura 4,04 mm.

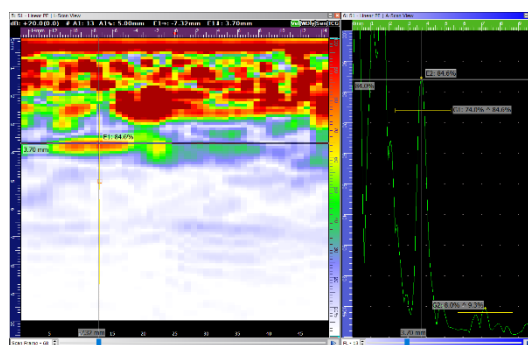


Figura 88: Inclusão de alumínio de dimensões 10×10 mm² colocada na zona de espessura 6,95 mm.

Inclusões de filme de vácuo

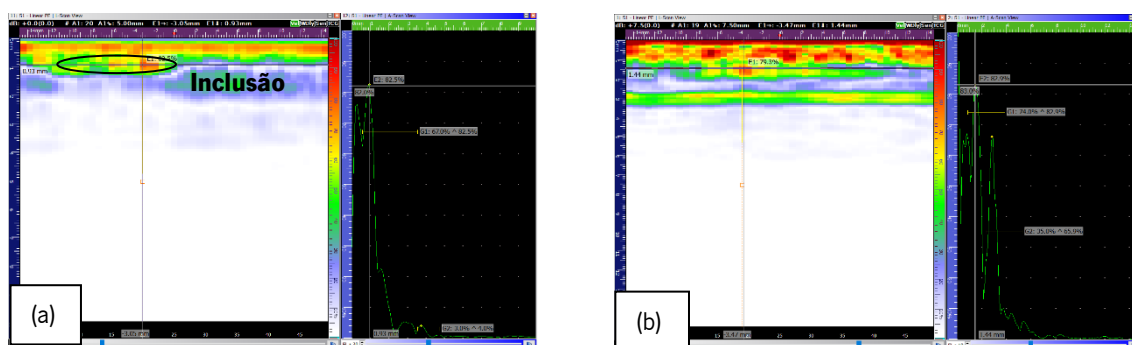


Figura 89: (a) Inclusão de filme de vácuo de dimensões 10×10 mm² colocada na zona de espessura 8,60 mm; (b) inclusão de filme de vácuo de dimensões 5×5 mm² colocada na zona de espessura 3,13 mm.

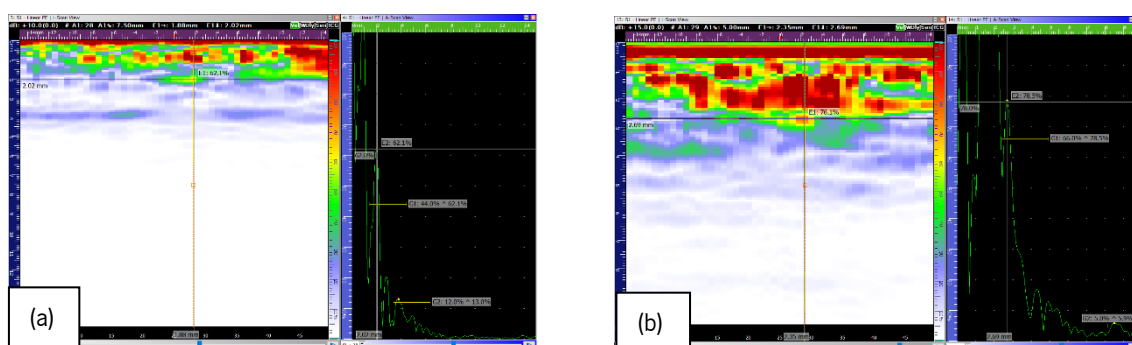


Figura 90: (a) Inclusão de filme de vácuo de dimensões 6×6 mm² colocada na zona de espessura 4,04 mm; (b) inclusão de filme de vácuo de dimensões 3×3 mm² colocada na zona de espessura 8,60 mm.

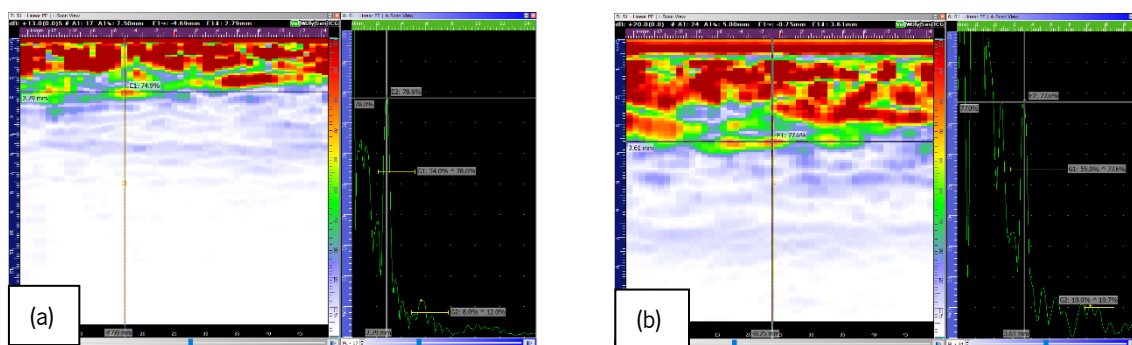


Figura 91: (a) Inclusão de filme de vácuo de dimensões 7×7 mm² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de filme de vácuo de dimensões 8×8 mm² colocada na zona de espessura 6,95 mm.

Inclusões de *Teflon™*

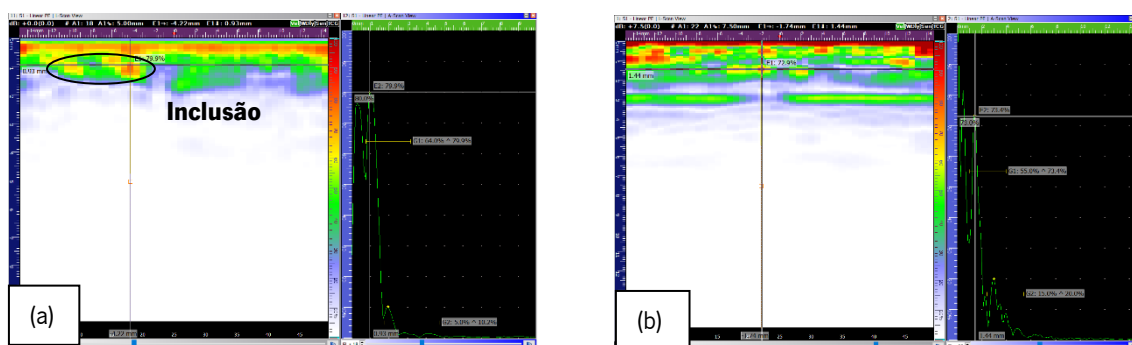


Figura 92: (a) Inclusão de *Teflon™* de dimensões 8×8 mm² colocada na zona de espessura 8,60 mm; (b) inclusão de *Teflon™* de dimensões 4×4 mm² colocada na zona de espessura 3,13 mm.

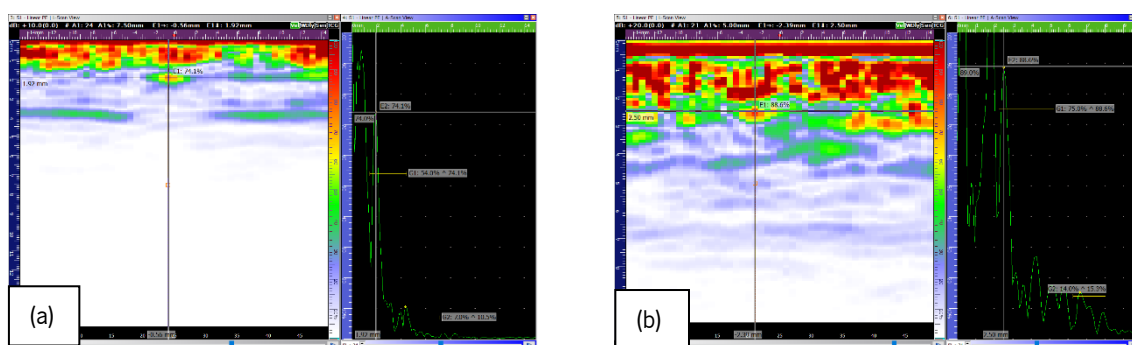


Figura 93: (a) Inclusão de *Teflon™* de dimensões 5×5 mm² colocada na zona de espessura 4,04 mm; (b) inclusão de *Teflon™* de dimensões 3×3 mm² colocada na zona de espessura 6,95 mm.

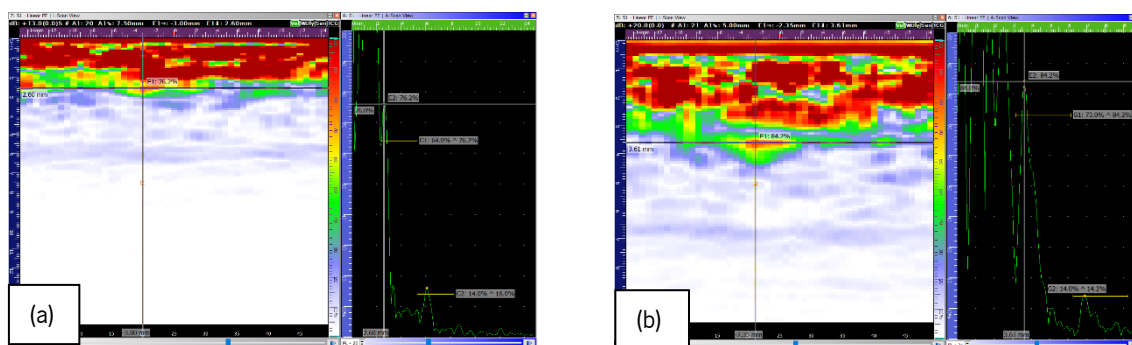


Figura 94: (a) Inclusão de *Teflon™* de dimensões 6×6 mm² colocada na zona de espessura 5,83 mm; (b) inclusão de *Teflon™* de dimensões 7×7 mm² colocada na zona de espessura 6,95 mm.

A Tabela 23 apresenta a constituição dos materiais inseridos no laminado.

Tabela 23: Composição dos materiais inseridos no laminado C_1.

Materiais	Constituição
<i>Peel ply</i>	Poliamida
Fita adesiva	Poliéster
PET/Al/PE	Poli(tereftalato de etileno), alumínio e polietileno
Alumínio	Alumínio
Filme de vácuo	Poliamida
<i>Teflon™</i>	Poli(tetraflúor de etileno)

A detecção dos materiais introduzidos entre as camadas do laminado foi possível, porque as propriedades (p. ex. massa volúmica e rigidez) destes materiais são, consideravelmente, distintas das do meio envolvente (matriz de epóxico/fibra de vidro). Esta diferença nas propriedades resultou numa alteração da velocidade de transmissão das ondas de ultrassom e na sua reflexão, tal como mostram as vistas *A-Scan* e *L-Scan* das Figuras 77 a 94.

As vistas *A-Scan* e *L-Scan* das Figuras 77, 80, 83 (b), 92 (b) e 93 (a) revelam que, as inclusões de *peel ply* (10×10 mm², 4×4 mm²), fita adesiva (10×10 mm², 8×8 mm²), PET/Al/PE (7×7 mm²) e *Teflon™* (4×4 mm², 5×5 mm²) refletiram o sinal, praticamente, na sua totalidade, deixando a face oposta do laminado de ser detetada, nas zonas onde estas mesmas se localizam. A elevada reflexão do sinal provocada por estes materiais, bem como, a baixa amplitude do sinal do fundo do laminado, levam a afirmar que, as ondas sonoras quase não se propagaram ao longo da espessura destas inclusões. Por outro lado, as figuras 86 (b), 87 (a) e 89 (b) mostram que as inclusões de alumínio (6×6 mm², 3×3 mm²) e de filme de vácuo (5×5 mm²) para além de terem refletido as ondas sonoras, também permitiram a transmissão do som, sendo a superfície oposta do laminado detetada. A diferente interação dos ultrassons com um determinado tipo de material, depende das suas propriedades acústicas, pelo que podem ocorrer vários fenómenos físicos que afetam a transmissão das ondas sonoras.

A partir da análise das Figuras 77 a 94 percebe-se que, o sinal de UT das inclusões foi afetado por fatores como as suas dimensões e profundidade. Por exemplo, comparando a inclusão

de alumínio de dimensões $6 \times 6 \text{ mm}^2$ e profundidade 1,25 mm, com a inclusão do mesmo material, mas de dimensões $7 \times 7 \text{ mm}^2$ e profundidade 2,02 mm verificou-se que, com o aumento da profundidade e do tamanho, a amplitude do sinal do fundo do laminado diminuiu, tornando-se este cada vez mais esbatido (ver Figuras 86 (b) e 87 (b)). Isto deveu-se não só ao efeito de atenuação, mas também ao facto de que, quanto menor for o tamanho de um defeito, maior a facilidade das ondas sonoras em “contorná-lo” e, conseqüentemente, menos esbatida se apresentará a face oposta do laminado.

É evidente, através da vista *L-Scan* das Figuras 77 a 94, que à medida que a espessura do laminado aumentou, a detetabilidade do seu fundo se tornou cada vez mais reduzida (diminuição da amplitude do sinal do fundo), devido ao efeito crescente da atenuação. Por outro lado, com o aumento da espessura do laminado houve a necessidade de aumentar o ganho aplicado ao sinal de UT, de modo a contrariar a atenuação. Contudo, o aumento do ganho associado à também elevada reflexão provocada pelas fibras de vidro originou zonas de elevado ruído (zonas de cor vermelha de elevada amplitude de sinal junto ao reflexo da superfície), que dificultaram a deteção das inclusões, assim como, a observação na vista *L-Scan* do reflexo relativo à superfície do laminado (ver Figuras 78, 79, 81 (b), 82, 85, 88, 90 (b), 91, 93 (b) e 94).

Todas as inclusões inseridas no laminado foram detetadas, exceto as de PET/Al/PE ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) e de alumínio ($4 \times 4 \text{ mm}^2$) colocadas na zona de espessura 8,60 mm. Para a não deteção destas duas inclusões contribuíram vários fatores como a elevada atenuação, a profundidade a que foram colocadas (camada 43) e as suas dimensões reduzidas (ver Figura 95).

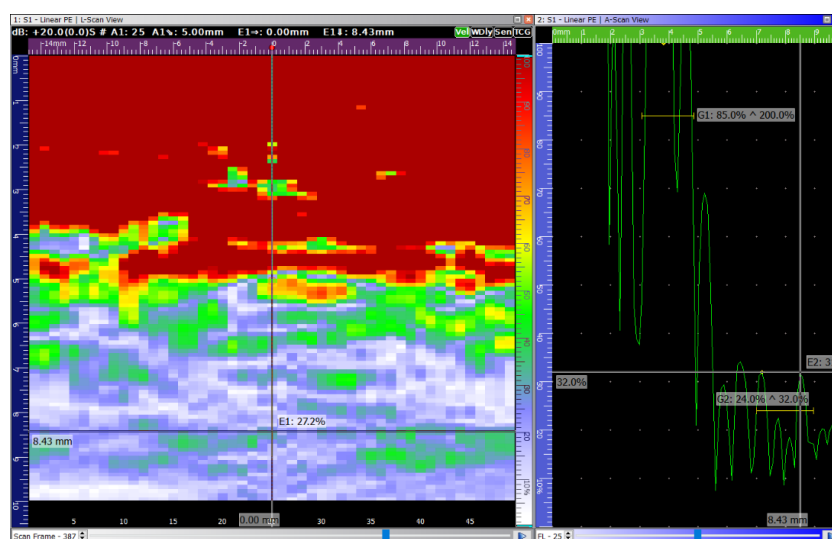


Figura 95: Zona de provável localização da inclusão de PET/Al/PE de dimensões $5 \times 5 \text{ mm}^2$.

Através da técnica de ultrassons foi possível determinar a profundidade e as dimensões das inclusões como o comprimento e a espessura. Para a obtenção da profundidade das inclusões, recorreu-se ao referencial cartesiano (x, y) da vista *L-Scan*, colocando a origem deste, na zona da descontinuidade onde a amplitude do seu sinal era mais elevada. Por exemplo, a Figura 96 (a) mostra que, a inclusão de PET/Al/PE ($7 \times 7 \text{ mm}^2$) foi detetada a uma profundidade de 1,44 mm da superfície do laminado. No que concerne à obtenção do comprimento e da espessura das inclusões, recorreu-se a dois referenciais cartesianos (x, y) da representação *L-Scan*, com o objetivo de definir os limites de cada descontinuidade. Considerou-se que, o comprimento de uma inclusão seria a distância máxima medida na direção horizontal, entre dois eixos verticais, colocados no limite de detetabilidade do sinal de UT da descontinuidade. Em relação à espessura, esta corresponde à distância máxima medida na direção vertical, entre dois eixos horizontais, posicionados no limite de detetabilidade do sinal da inclusão. Por exemplo, a Figura 96 (b) indica que a inclusão de PET/Al/PE apresenta um comprimento de 6,96 mm ($7,01 - 0,05 = 6,96 \text{ mm}$) e uma espessura de 0,66 mm ($1,87 - 1,21 = 0,66 \text{ mm}$).

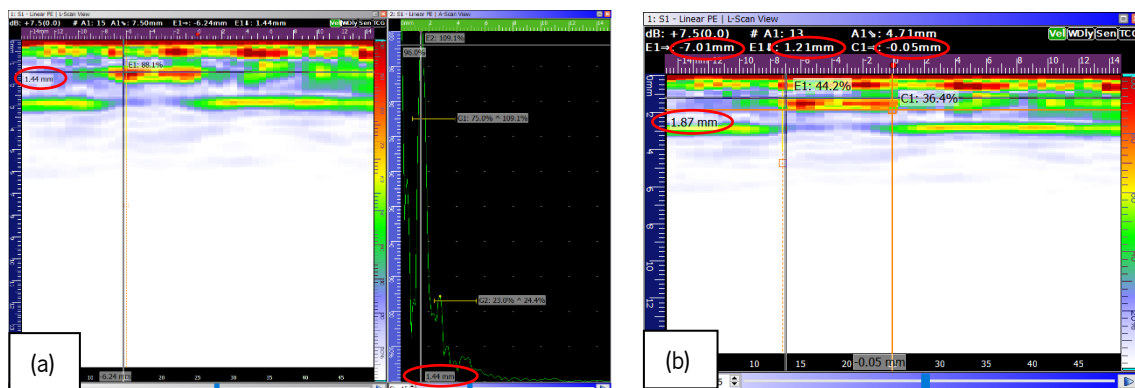


Figura 96: Obtenção por UT da profundidade e dimensões da inclusão de PET/Al/PE, de dimensões nominais $7 \times 7 \text{ mm}^2$ colocada na zona de espessura 3,13 mm.

De mencionar que, devido ao facto de se não ter utilizado *encoder*, não foi possível determinar a largura dos corpos estranhos. Nas Tabelas 24 a 28 são indicadas as profundidades e as dimensões (comprimento e a espessura) de cada inclusão introduzida nas zonas S1, S2, S3, S4 e S5.

Tabela 24: Profundidade e dimensões das inclusões inseridas na zona S1.

Zona S1				
Espessura medida: 3,13 mm				
Espessura teórica: 3,90 mm				
Inclusões	Profundidade teórica [mm]	Profundidade dada por UT [mm]	Comprimento dado por UT [mm]	Espessura dada por UT [mm]
<i>Peel ply</i> (10×10 mm)	0,79 (camada 4)	0,48	10,01	0,66
Fita adesiva (8×8 mm)	0,79 (camada 4)	0,48	8,09	0,78
PET/Al/PE (7×7 mm)	1,78 (camada 9)	1,44	6,96	0,66
Alumínio (6×6 mm)	1,78 (camada 9)	1,25	6,17	0,35
Filme de vácuo (5×5 mm)	2,57 (camada 13)	1,44	4,96	0,58
<i>Teflon™</i> (4×4 mm)	2,57 (camada 13)	1,44	4,02	0,50
PET/Al/PE (3×3 mm)	2,77 (camada 14)	1,73	2,95	0,36
Alumínio (3×3 mm)	2,77 (camada 14)	1,63	2,95	0,28

Tabela 25: Profundidade e dimensões das inclusões colocadas na zona S2.

Zona S2				
Espessura medida: 4,04 mm				
Espessura teórica: 5,12 mm				
Inclusões	Profundidade teórica [mm]	Profundidade dada por UT [mm]	Comprimento dado por UT [mm]	Espessura dada por UT [mm]
Fita adesiva (10×10 mm)	2,12 (camada 11)	1,92	10,95	0,62
PET/Al/PE (8×8 mm)	2,12 (camada 11)	1,92	7,85	0,55
Alumínio (7×7 mm)	2,12 (camada 11)	2,02	7,06	0,63
Filme de vácuo (6×6 mm)	2,12 (camada 11)	2,02	5,53	0,31
<i>Teflon™</i> (5×5 mm)	2,12 (camada 11)	1,92	4,91	0,45
<i>Peel ply</i> (4×4 mm)	2,12 (camada 11)	1,92	4,82	0,54
Fita adesiva (3×3 mm)	2,70 (camada 14)	2,31	2,90	0,31

Tabela 26: Profundidade e dimensões das inclusões inseridas na zona S3.

Zona S3				
Espessura medida: 5,83 mm				
Espessura teórica: 7,55 mm				
Inclusões	Profundidade teórica [mm]	Profundidade dada por UT [mm]	Comprimento dado por UT [mm]	Espessura dada por UT [mm]
PET/Al/PE (10×10 mm)	0,75 (camada 4)	0,58	9,82	0,62
Alumínio (8×8 mm)	0,75 (camada 4)	0,58	7,99	0,67
Filme de vácuo (7×7 mm)	3,01 (camada 16)	2,79	6,59	0,45
<i>Teflon™</i> (6×6 mm)	3,01 (camada 16)	2,60	5,98	0,59
<i>Peel ply</i> (5×5 mm)	5,26 (camada 28)	4,23	4,79	0,57
Fita adesiva (4×4 mm)	5,26 (camada 28)	4,33	3,83	0,51
<i>Peel ply</i> (3×3 mm)	2,63 (camada 14)	2,98	2,71	0,48

Tabela 27: Profundidade e dimensões das inclusões introduzidas na zona S4.

Zona S4				
Espessura medida: 6,95 mm				
Espessura teórica: 8,77 mm				
Inclusões	Profundidade teórica [mm]	Profundidade dada por UT [mm]	Comprimento dado por UT [mm]	Espessura dada por UT [mm]
Alumínio (10×10 mm)	3,66 (camada 19)	3,70	9,63	0,49
Filme de vácuo (8×8 mm)	3,66 (camada 19)	3,61	7,93	0,38
<i>Teflon™</i> (7×7 mm)	3,66 (camada 19)	3,61	7,00	0,50
<i>Peel ply</i> (6×6 mm)	3,66 (camada 19)	3,61	5,99	0,39
Fita adesiva (5×5 mm)	3,66 (camada 19)	3,80	5,02	0,32
PET/Al/PE (4×4 mm)	3,66 (camada 19)	3,52	4,02	0,40
<i>Teflon™</i> (3×3 mm)	2,70 (camada 14)	2,50	2,99	0,50

Tabela 28: Profundidade e dimensões das inclusões inseridas na zona S5.

Zona S5				
Espessura medida: 8,60 mm				
Espessura teórica: 11,21 mm				
Inclusões	Profundidade teórica [mm]	Profundidade dada por UT [mm]	Comprimento dado por UT [mm]	Espessura dada por UT [mm]
Filme de vácuo (10×10 mm)	0,75 (camada 4)	0,93	10,52	0,54
<i>Teflon™</i> (8×8 mm)	0,75 (camada 4)	0,93	7,99	0,54
<i>Peel ply</i> (7×7 mm)	4,51 (camada 24)	4,35	7,00	0,36
Fita adesiva (6×6 mm)	4,51 (camada 24)	4,44	6,23	0,43
PET/Al/PE (5×5 mm)	8,09 (camada 43)	-	-	-
Alumínio (4×4 mm)	8,09 (camada 43)	-	-	-
Filme de vácuo (3×3 mm)	2,63 (camada 14)	2,69	2,77	0,39

Segundo os resultados apresentados nas Tabelas 24 a 28, verifica-se uma ligeira tendência para o aumento do desvio entre os valores teóricos da profundidade e os determinados por UT, com o aumento da profundidade das inclusões. Os resultados apresentados nas Tabelas 24 a 28 também permitem dizer que, os comprimentos obtidos por UT para as inclusões se aproximam dos seus comprimentos nominais.

A Tabela 29 mostra a espessura média dos materiais introduzidos no laminado C_1. Após a obtenção da espessura de todas as inclusões por UT, determinou-se para cada material a sua espessura média.

Tabela 29: Espessura média dos materiais introduzidos no laminado C_1.

Materiais	Espessura [mm]
Filme de vácuo	0,44 ± 0,10
<i>Teflon™</i>	0,51 ± 0,05
<i>Peel ply</i>	0,50 ± 0,11
Fita adesiva	0,50 ± 0,18
PET/Al/PE	0,56 ± 0,11
Alumínio	0,54 ± 0,15

4.3. Caracterização do dano de impacto de baixa energia

4.3.1. Análise do dano induzido nos laminados de fibra de vidro/epóxico

Os provetes de laminados de fibra de vidro/epóxico, de espessura média 2,99 mm, foram submetidos a solicitações de impacto de baixa energia. Estes foram sujeitos a diferentes velocidades de impacto, nomeadamente entre 0,99 m/s e 3,16 m/s. Em termos de energia de impacto, as amostras foram submetidas a energias entre 1 J e 80,3 J. A Tabela 30 indica a energia de impacto determinada para cada provete. De referir que, a amostra denominada de “Placa 4” foi excluída para efeitos de análise, uma vez que, foi sujeita a dois impactos consecutivos.

Tabela 30: Valores de energia de impacto calculados para os laminados de fibra de vidro/epóxico.

Designação dos provetes	Energia de impacto [J]	Velocidade de impacto [m/s]	Massa [kg]	Altura de queda [m]
Placa 10	80,30	3,16	16,04	0,51
Placa 1	10,04	2,00	5,05	0,20
Placa 2	5,04	1,41	5,05	0,10
Placa 3	2,50	0,99	5,05	0,05
Placa 7	2,00	1,40	2,05	0,10
Placa 9	1,74	1,31	2,05	0,09
Placa 6	1,50	1,20	2,05	0,08
Placa 8	1,26	1,11	2,05	0,06
Placa 5	1,00	0,99	2,05	0,05

As Figuras 97 e 98 ilustram as curvas força – tempo e energia – tempo, respetivamente, relativas às placas submetidas aos impactos de energia 1 J, 10 J e 80,3 J. A Tabela 31 mostra os valores de força máxima e energia absorvida obtidos para as placas 1, 5 e 10. De referir que, os historiais de força de contacto e energia dos laminados sujeitos aos impactos de energia entre 1,26 J e 5 J, não são apresentados devido a problemas que se sucederam com o sistema de aquisição de dados, durante os ensaios.

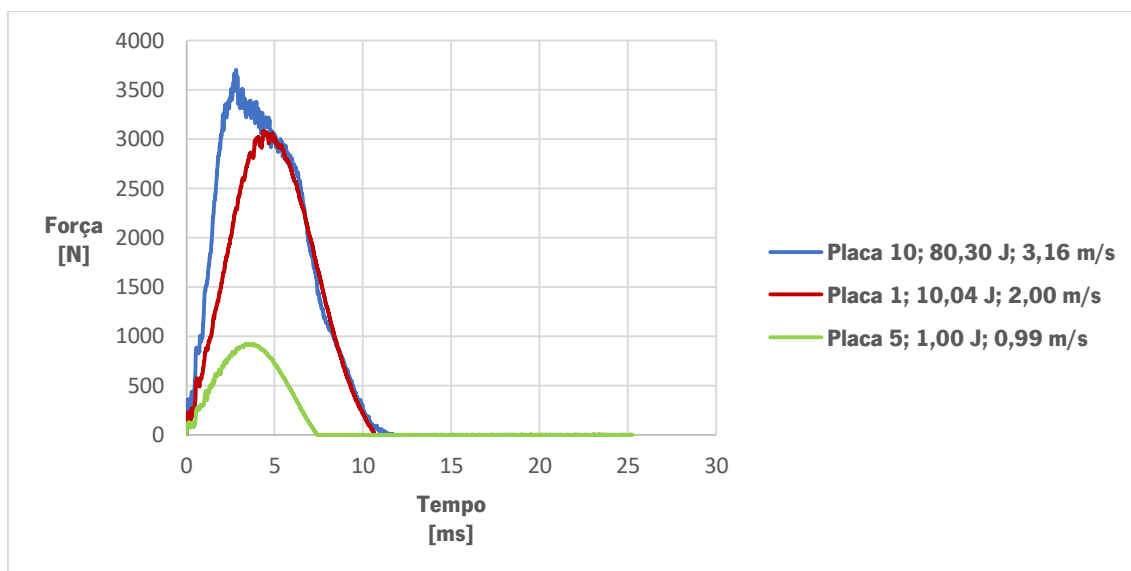


Figura 97: Gráfico Força (N) – Tempo (ms) relativo às placas 1, 5 e 10.

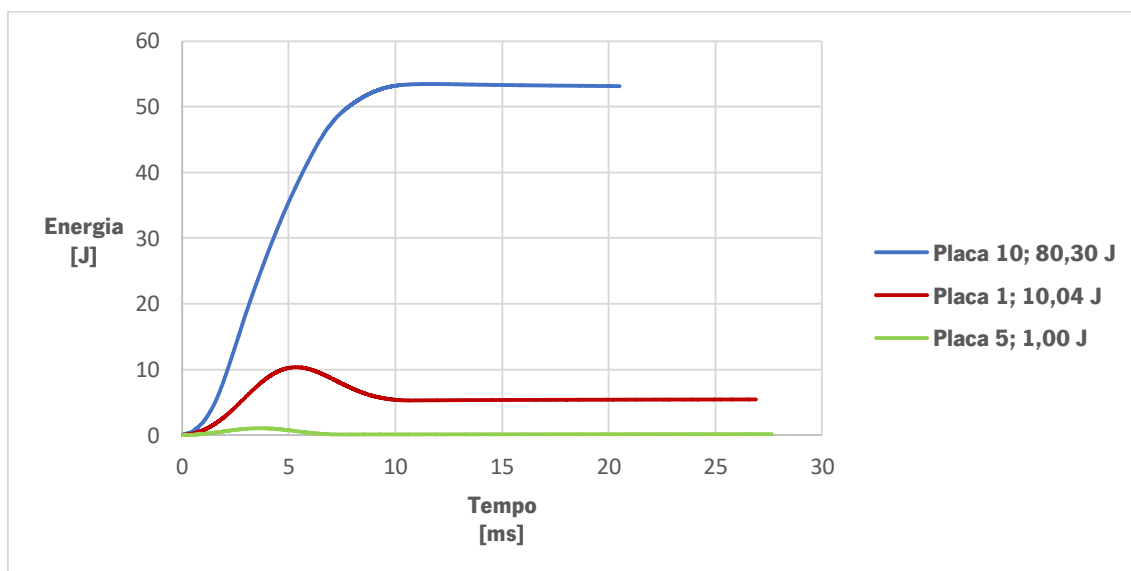


Figura 98: Gráfico Energia (J) – Tempo (ms) relativo às placas 1, 5 e 10.

Tabela 31: Valores de força máxima de impacto e energia absorvida, obtidos para os laminados de fibra de vidro/epóxico, sujeitos aos impactos de energia 1 J, 10 J e 80,3 J.

Denominação das amostras	Energia de impacto [J]	Força máxima de impacto [N]	Energia absorvida [J]
Placa 10	80,30	3701,76	53,44
Placa 1	10,04	3080,44	5,28
Placa 5	1,00	923,84	0,10

A partir da geometria da curva força – tempo, é possível retirar informações acerca da ocorrência de danos numa amostra, durante o ensaio de impacto [10]. Assim, é visível na curva força – tempo da Figura 97, referente ao laminado submetido ao impacto de energia 80,3 J, uma diminuição acentuada da força de contacto, após esta ter atingido o valor máximo de 3,7 kN. Segundo *Schoeppner* e *Abrate* [54] quando se observa numa curva força – tempo uma queda brusca da força de contacto, a carga a que isso acontece é denominada de força crítica para o início da delaminação (*Delamination threshold load*) e resulta da diminuição da rigidez da amostra, devido à presença de danos [54]. Isto permite dizer que, este laminado sofreu danos significativos durante o ensaio. A curva energia – tempo relativa à placa 10 da Figura 98, mostra que após atingida a energia de impacto máxima, não ocorreu a conversão desta em energia de deformação elástica e a sua posterior dissipação sob a forma de calor. Assim, pode-se afirmar que o impactor embateu no laminado e penetrou-o totalmente, o que está de acordo com a inspeção visual, tal como mostra a Figura 99.

A curva força – tempo da Figura 97, alusiva ao impacto de energia 10 J, indica que esta solicitação causou danos no provete, pois verificam-se oscilações na força de contacto, em torno da carga máxima de 3,1 kN. Segundo *David H. Nash et al.* [55] estas oscilações revelam a presença de fissuras matriciais [55], pelo que, está de acordo com a inspeção visual, pois foram detetadas fissuras na face frontal e oposta deste laminado (ver Figura 99).

No historial de força de contacto da Figura 97, relativo à placa 5, não se observou uma diminuição brusca da força, sendo a resposta do laminado quase-estática e linear. Isto permite dizer que, o impacto de energia 1 J não gerou danos. Contudo, a inspeção visual e a análise UT

realizadas nesta placa após o ensaio de impacto, revelaram a existência de danos, tal como mostram as Figuras 100 e 110.

Conforme se pode observar nas curvas energia – tempo da Figura 98, as solicitações de impacto de energia 1 J e 10 J não foram suficientes para provocar a penetração total do impactor nos provetes. Durante estes impactos, parte da energia foi absorvida pelas amostras, ao passo que, a restante foi dissipada.

Na Figura 97 é possível visualizar no início das três curvas força – tempo, pequenas oscilações na força de contacto, as quais estão relacionadas com a reposta elástica das ondas e vibrações das amostras [54].

4.3.1.1. Inspeção visual

Com o objetivo de caracterizar o dano sofrido pelos laminados de fibra de vidro/epóxico, estes foram analisados por inspeção visual. Avaliou-se a superfície frontal (zona de impacto) e oposta dos provetes, com o recurso a um microscópio ótico. As Figuras 99 e 100 apresentam a face frontal e traseira das amostras, após os ensaios de impacto.

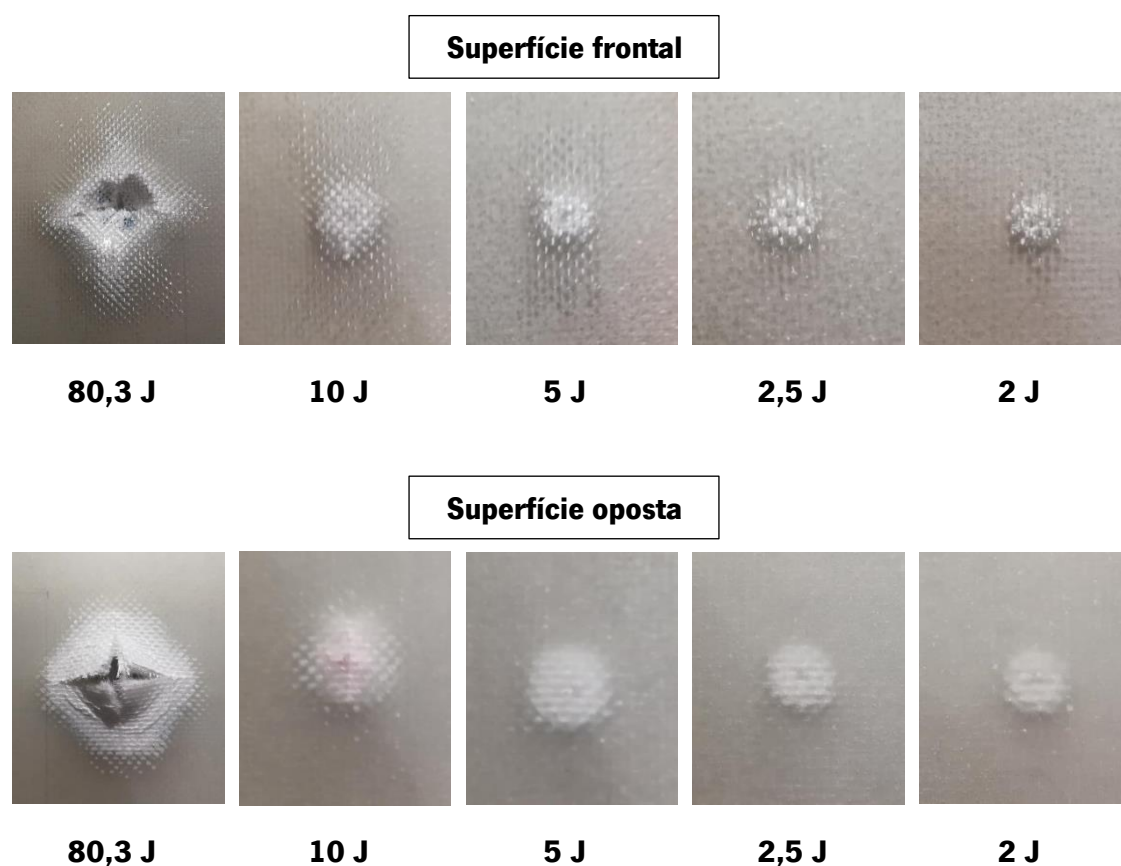


Figura 99: Evolução do dano nos laminados de fibra de vidro/epóxico sujeitos a impactos de energia entre 2 J e 80,3 J.

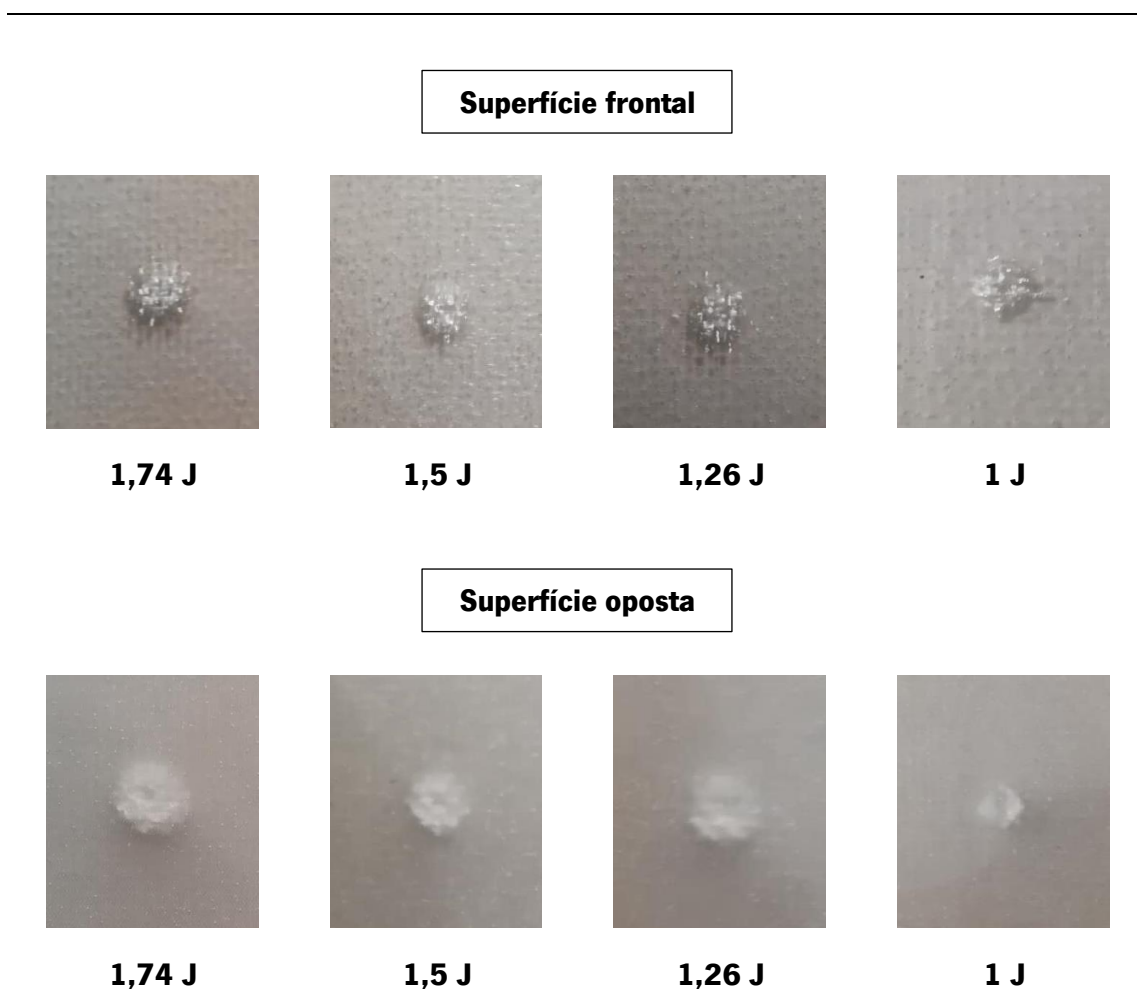


Figura 100: Evolução do dano nos laminados de fibra de vidro/epóxico sujeitos a impactos de energia entre 1 J e 1,74 J.

Como os laminados de fibra de vidro/epóxico são compósitos translúcidos, o dano causado pelos impactos pode ser observado a olho nu. A Figura 99 mostra que no impacto de energia 80,3 J, o impactor penetrou totalmente no laminado, originando a rotura da matriz e das fibras. Tanto na superfície frontal como na oposta é visível uma área de delaminação (zona esbranquiçada) em forma de losango, localizada em torno do ponto de impacto. Esta área parece orientar-se segundo as direções principais do tecido, ou seja, a 0° e 90°.

Conforme se pode visualizar nas Figuras 99 e 100, os impactos de energia 1 J a 10 J originaram uma área de delaminação de geometria circular, junto do ponto de impacto, perfeitamente visível nas faces frontais e opostas das placas. Na Figura 102 e na Tabela 44 do Anexo G é apresentada a variação da área de delaminação em função da energia de impacto. Para a obtenção da área de delaminação, assumiu-se que o dano tinha uma geometria circular, e por conseguinte mediu-se o diâmetro máximo da área esbranquiçada com o recurso a um microscópio ótico e a uma régua (ver Figura 101).

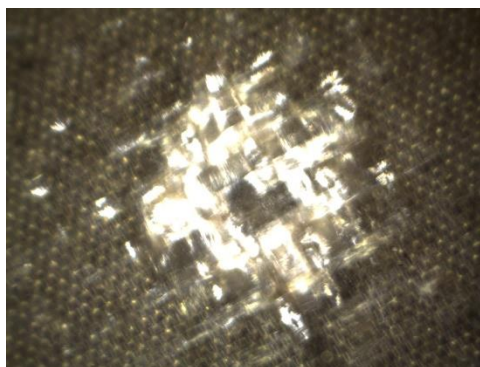


Figura 101: Visualização a partir do microscópio ótico da região delaminada causada pelo impacto de energia 1 J na placa 5.

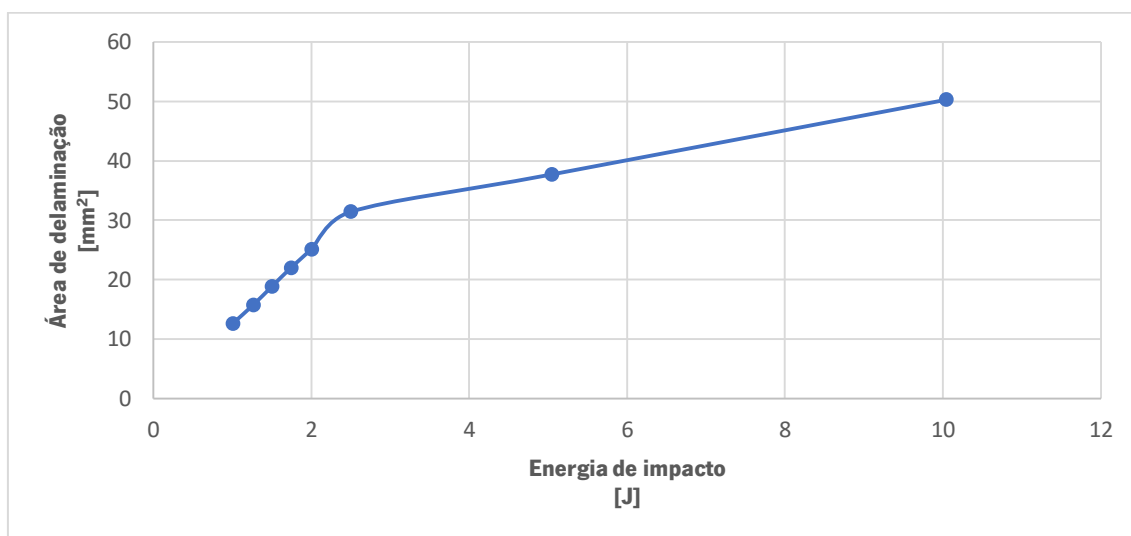


Figura 102: Variação da área de delaminação em função da energia de impacto.

Verificou-se uma relação aproximadamente linear entre a energia de impacto e a área de dano, isto é, à medida que a energia de impacto aumentou, a área de delaminação também aumentou. Por outro lado, constatou-se que a indentação superficial se tornou mais severa com o aumento da energia de impacto. De referir que, o laminado submetido ao impacto de energia 10 J, apresentou na sua superfície frontal e junto da zona de impacto, pequenas fissuras na matriz de epóxico, enquanto na superfície oposta foi identificada uma pequena saliência, sendo também visível uma fissura na matriz (ver Figura 99).

O dano provocado nas amostras pelos impactos de energia 1 J a 80,3 J, resultou do facto de as lâminas junto à região de contacto do impactor terem sido solicitadas à compressão, enquanto as lâminas junto à superfície oposta foram solicitadas à tração.

4.3.1.2. Análise por ultrassons

De modo a avaliar o dano de impacto ao longo da espessura dos laminados, foi usada neste trabalho experimental a técnica de análise de ultrassons. A integridade de cada amostra foi avaliada antes e após a realização dos ensaios de impacto, tendo sido utilizada uma sonda *Phased Array* de frequência 5 MHz. Na Tabela 32 são indicadas as velocidades de propagação obtidas para as ondas de ultrassom longitudinais e transversais, antes e após a realização dos ensaios.

Tabela 32: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais nos laminados de fibra de vidro/epóxico, antes e após a realização dos ensaios de impacto.

	Antes dos ensaios de impacto	Após os ensaios de impacto
Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais [mm/ μ s]	2,912	3,154
Velocidade de propagação das ondas de ultrassom transversais [mm/ μ s]	1,950	1,950

De acordo com a Tabela 32, verificou-se que a velocidade de propagação das ondas longitudinais aumentou, ligeiramente, de 2,912 mm/ μ s antes dos ensaios de impacto, para 3,154 mm/ μ s, após a realização dos ensaios. Isto resultou do facto, de se ter efetuado a calibração do equipamento de UT por duas vezes: uma calibração para a inspeção dos provetes antes dos ensaios de impacto e outra após a realização dos ensaios.

Nas Figuras 103 a 110 são apresentados os resultados obtidos para os provetes, antes e depois da realização dos ensaios de impacto.

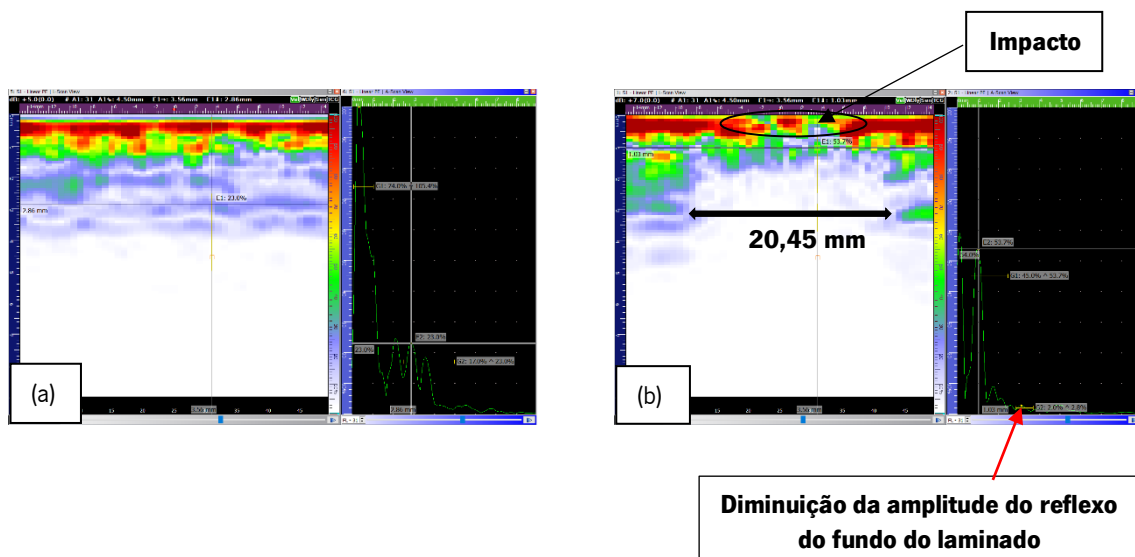


Figura 103: Scans relativos à Placa 1 – (a) antes do impacto de energia 10 J; (b) após impacto de energia 10 J.

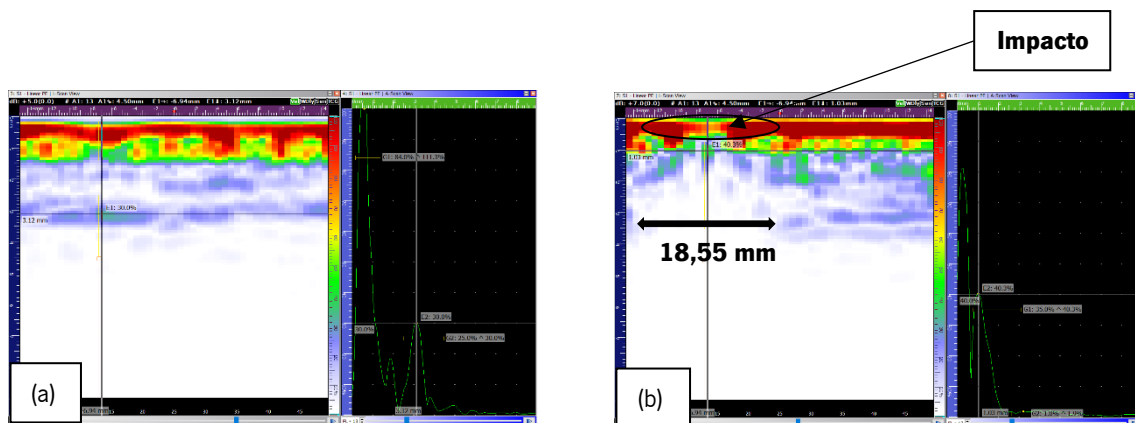


Figura 104: Scans relativos à Placa 2 – (a) antes do impacto de energia 5 J; (b) após impacto de energia 5 J.

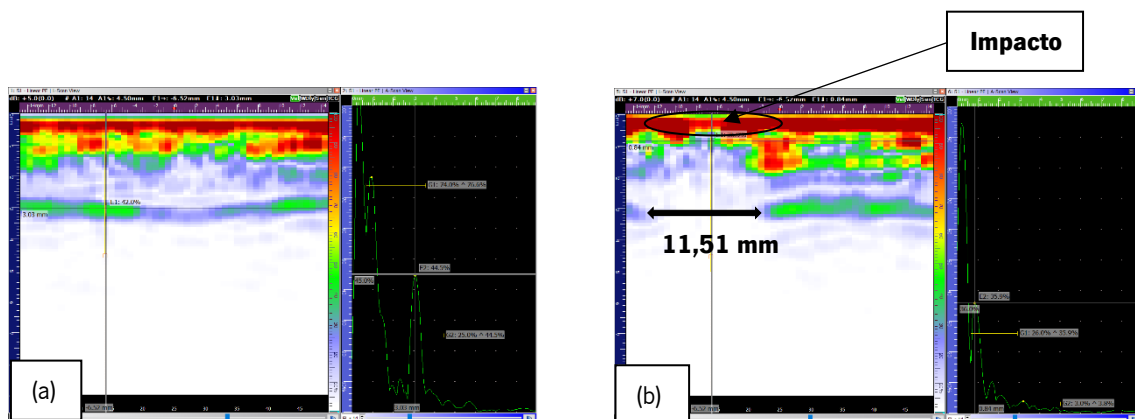


Figura 105: Scans relativos à Placa 3 – (a) antes do impacto de energia 2,5 J; (b) após impacto de energia 2,5 J.

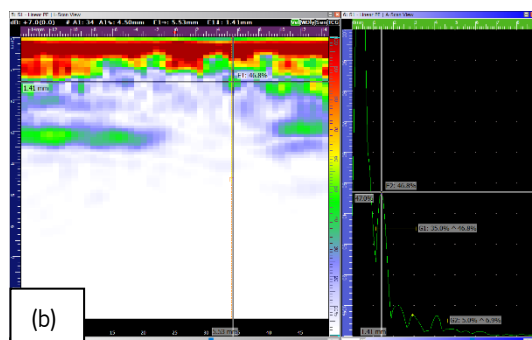
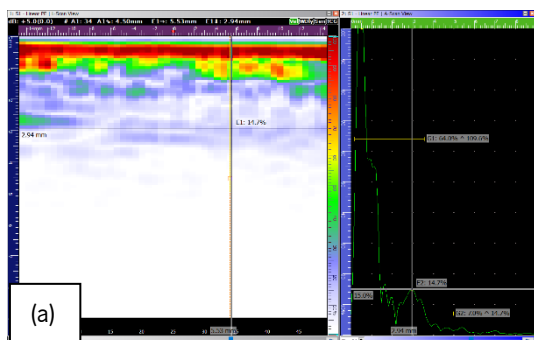


Figura 106: Scans relativos à Placa 7 – (a) antes do impacto de energia 2 J; (b) após impacto de energia 2 J.

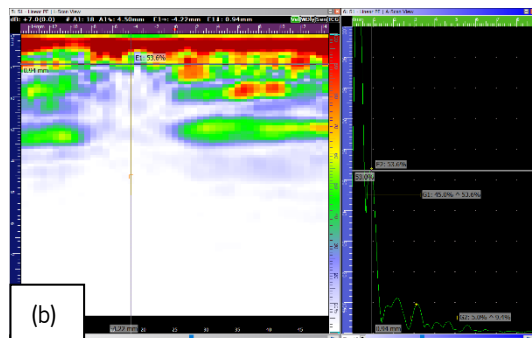
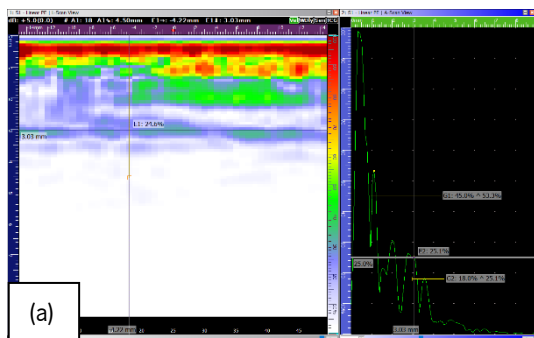


Figura 107: Scans relativos à Placa 9 – (a) antes do impacto de energia 1,74 J; (b) após impacto de energia 1,74 J.

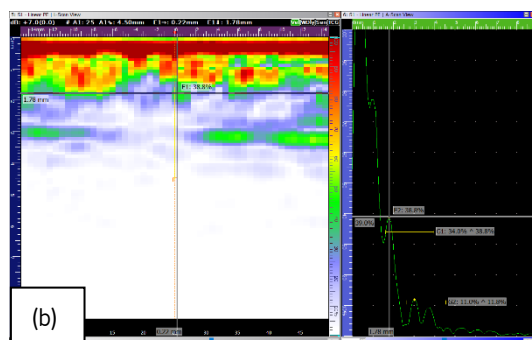
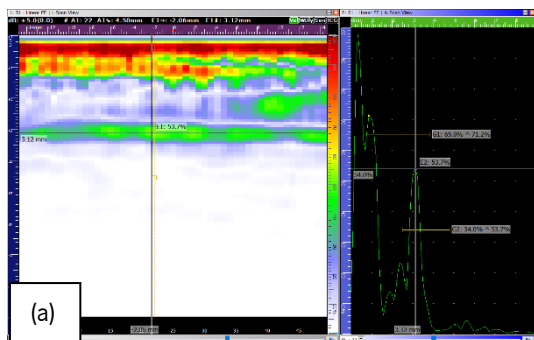


Figura 108: Scans relativos à Placa 6 – (a) antes do impacto de energia 1,5 J; (b) após impacto de energia 1,5 J.

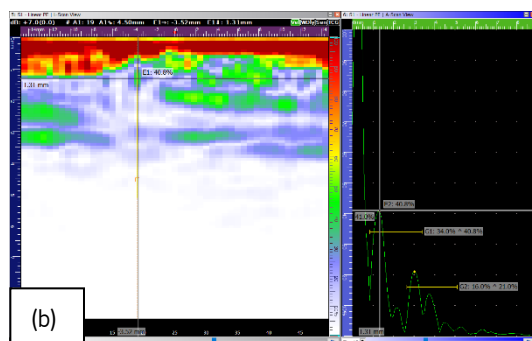
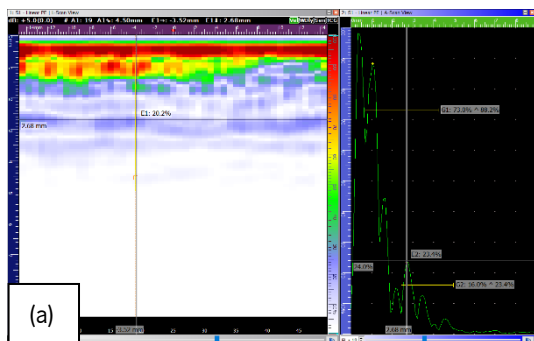


Figura 109: Scans relativos à Placa 8 – (a) antes do impacto de energia 1,26 J; (b) após impacto de energia 1,26 J.

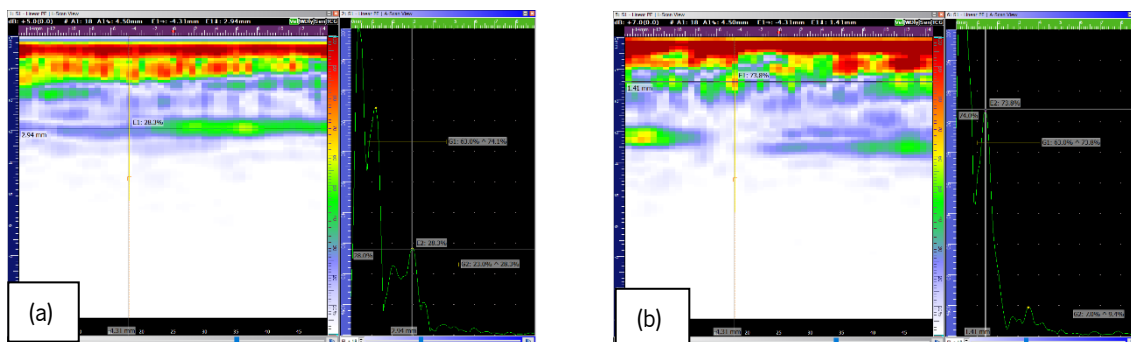


Figura 110: Scans relativos à Placa 5 – (a) antes do impacto de energia 1 J; (b) após impacto de energia 1 J.

A análise UT dos laminados antes dos ensaios de impacto, não revelou a presença de anomalias internas sérias, que tenham resultado do processo de produção VARI ou defeitos devido a operações de pós-processamento como, por exemplo, o corte dos provetes (ver Figuras 103 (a) a 110 (a)).

Na representação *L-Scan* das Figuras 103 (b) a 105 (b) é evidente que, os impactos de energia 2,5 J, 5 J e 10 J provocaram junto à região de contacto do impactor, a rotura dos laminados (rotura da matriz de epóxico e/ou rotura de fibras de vidro), resultando na descontinuidade do material e, consequentemente, do sinal de ultrassons. Por outro lado, não se verificou uma diminuição/falha no sinal da superfície das amostras submetidas aos impactos de energia entre 1 J e 2 J (ver Figuras 106 (b) a 110 (b)).

Segundo a vista *L-Scan* das Figuras 103 (b) a 110 (b), as delaminações parecem surgir como falhas no sinal de UT (sem sinal ou com diminuição significativa do sinal), junto à superfície de impacto. Como a área de dano constitui um meio não contínuo, as ondas sonoras não se propagaram, resultando na inexistência de sinal relativo à face oposta (não se observa o fundo do laminado). Para além disso, também se pode observar que, as solicitações de impacto provocaram em todos os laminados, um dano de formato cónico, em que o tamanho das delaminações aumentou das interfaces situadas junto à superfície solicitada, para as interfaces situadas mais longe dessa mesma superfície [4].

Através do método de ultrassons foi possível determinar o comprimento e a altura máxima do dano cónico. Para a obtenção do comprimento, que é medido na direção horizontal, recorreu-se a dois eixos verticais da representação *L-Scan*, para definir o limite do dano. Considerou-se que, o comprimento do dano seria a distância máxima entre dois eixos verticais, colocados no limite de detetabilidade do sinal do fundo do laminado. Por exemplo, a Figura 111 indica que o impacto de

energia 10 J causou no laminado, um dano de comprimento máximo 20,45 mm ($11,16 + 9,29 = 20,45$ mm).

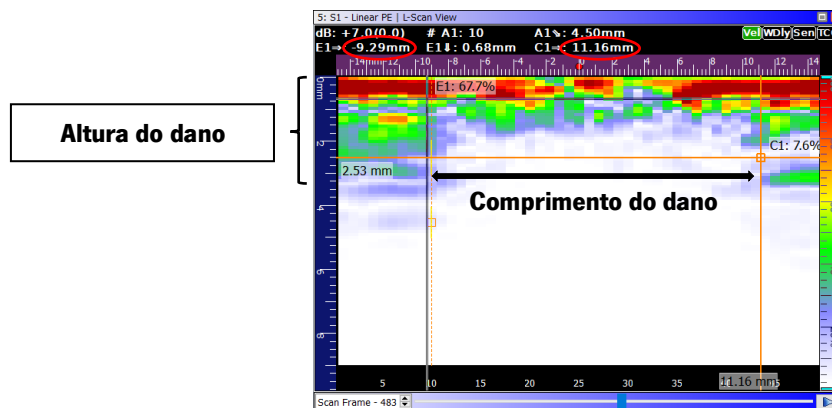


Figura 111: Obtenção das dimensões do dano causado pelo impacto de energia 10 J na placa 1.

Em relação à altura do dano, este é medido na direção vertical (ao longo da espessura) e corresponde à distância máxima, em que o sinal de UT deixa de ser detetado. No caso da Figura 111, verifica-se que o impacto de energia 10 J provocou um dano naquela região que atingiu toda a espessura da amostra. De referir que, as Figuras 103 (b) a 105 (b) indiciam um fenómeno de decréscimo da altura do dano, ao longo da espessura, à medida que a energia de impacto diminuiu. A Figura 112 e a Tabela 45 do Anexo G apresentam a variação do comprimento do dano cónico em função da energia de impacto.

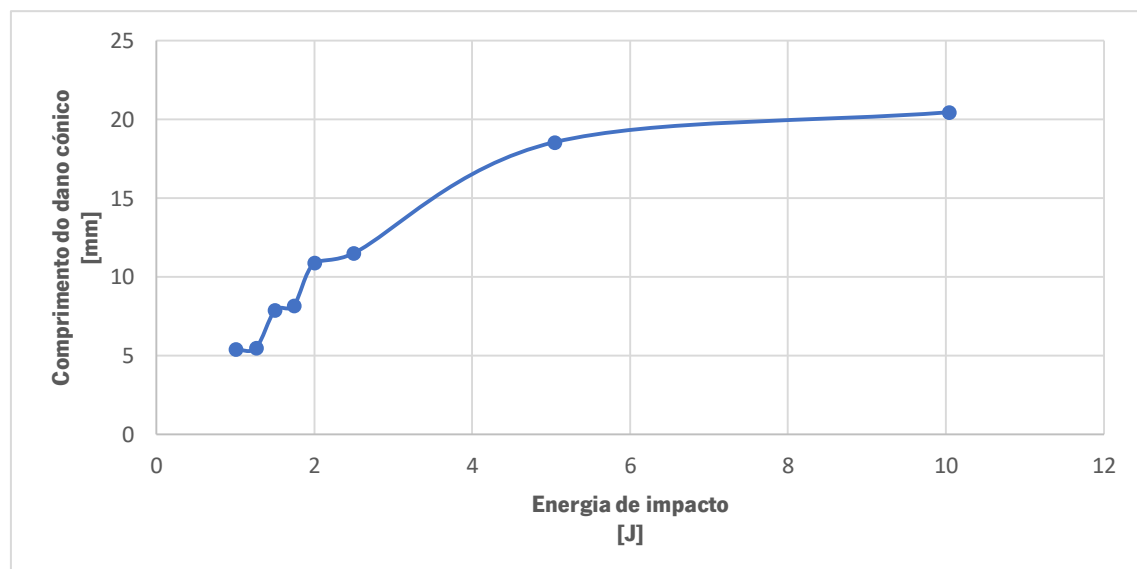


Figura 112: Variação do comprimento do dano cónico em função da energia de impacto.

A Figura 112 mostra a existência de uma concordância entre a energia de impacto e a extensão do dano. Isto é, o comprimento do dano cónico foi tanto maior quanto maior foi a energia de impacto. Existe uma explicação para tal comportamento, que se baseia no facto de quanto

maior for a energia de impacto, maior é a energia absorvida pela amostra, resultando numa maior deformação e dano.

4.3.2. Análise do dano induzido nos laminados de carbono/epóxico

As amostras de carbono/epóxico, de espessura média 3,70 mm, foram sujeitas a solicitações de impacto de baixa energia. Estas foram submetidas a diferentes velocidades de impacto, nomeadamente entre 1,26 m/s e 3,16 m/s. Em termos de energia de impacto, os laminados foram sujeitos a energias entre 4 J e 80,3 J. A Tabela 33 indica a energia de impacto determinada para cada laminado. De referir que, o provete denominado de “CF_Plate_3” foi excluído para efeitos de análise, visto que, foi sujeito a dois impactos consecutivos.

Tabela 33: Valores de energia de impacto calculados para os laminados de carbono/epóxico.

Denominação das amostras	Energia de impacto [J]	Velocidade de impacto [m/s]	Massa [kg]	Altura de queda [m]
CF_Plate_1	80,26	3,16	16,04	0,51
CF_Plate_2	10,04	2,00	5,05	0,20
CF_Plate_4	7,52	1,73	5,05	0,15
CF_Plate_5	6,04	1,55	5,05	0,12
CF_Plate_6	5,54	1,48	5,05	0,11
CF_Plate_9	5,04	1,41	5,05	0,10
CF_Plate_10	4,75	1,37	5,05	0,10
CF_Plate_7	4,50	1,34	5,05	0,09
CF_Plate_8	4,00	1,26	5,05	0,08

As Figuras 113 e 114 apresentam os históricos de força de contacto e energia, respetivamente, dos provetes submetidos aos impactos de energia entre 4 J e 80,3 J. A Tabela 34 mostra os valores de força máxima e energia absorvida obtidos para cada placa.

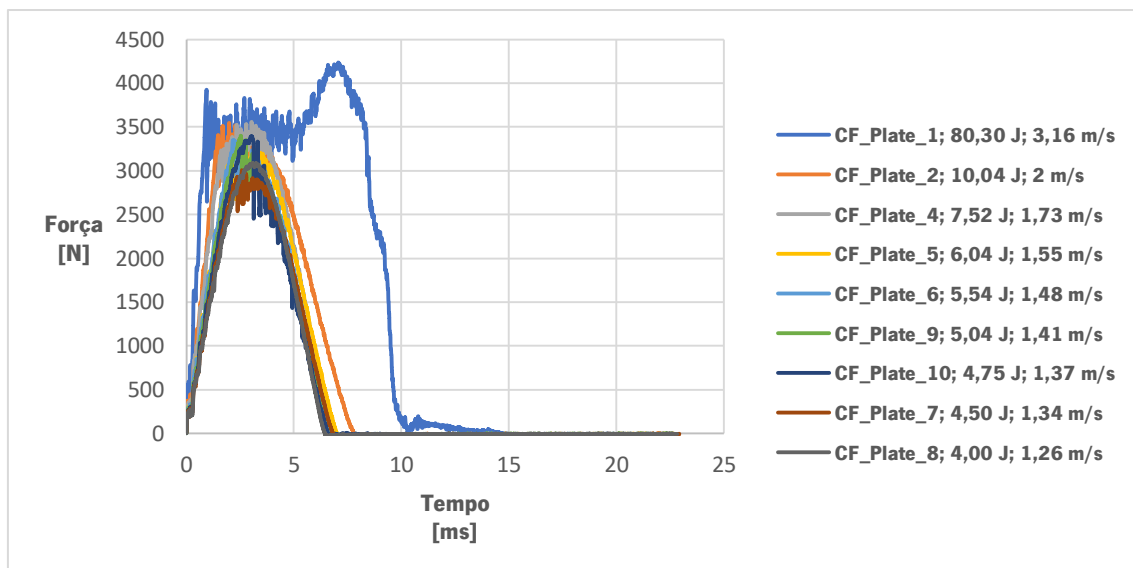


Figura 113: Gráfico Força (N) – Tempo (ms) relativo às amostras de carbono/epóxido, submetidas aos impactos de baixa energia.

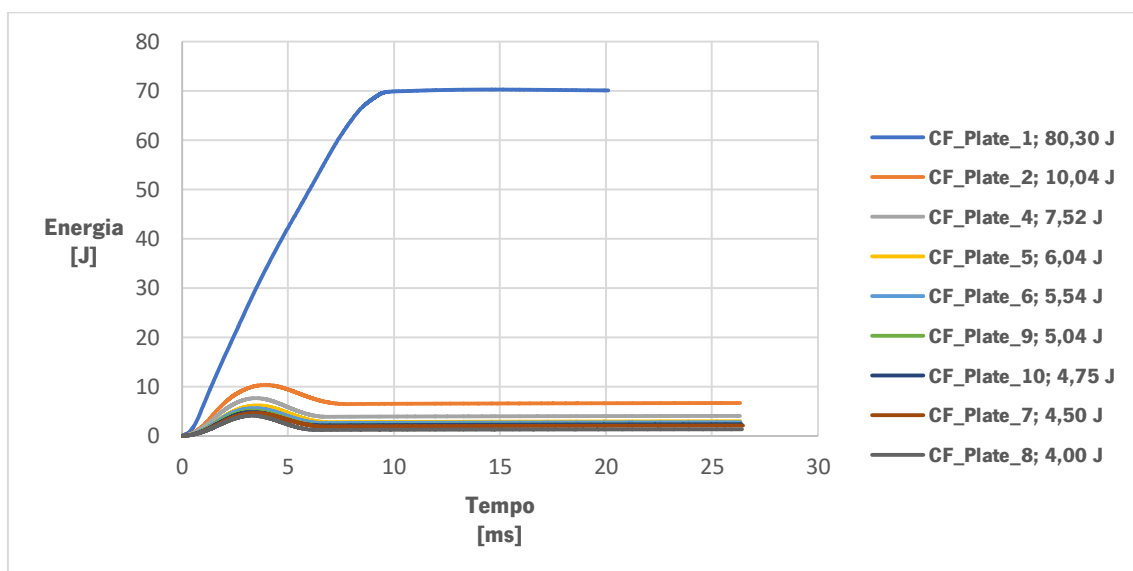


Figura 114: Gráfico Energia (J) – Tempo (ms) relativo às amostras de carbono/epóxido, submetidas aos impactos de baixa energia.

Tabela 34: Valores de força máxima de impacto e de energia absorvida obtidos para os laminados de carbono/epóxico, sujeitos aos impactos de energia entre 4 J e 80,3 J.

Designação dos provetes	Energia de impacto [J]	Força máxima de impacto [N]	Energia absorvida [J]
CF_Plate_1	80,26	4235,58	69,94
CF_Plate_2	10,04	3545,65	6,44
CF_Plate_4	7,52	3556,65	3,85
CF_Plate_5	6,04	3237,13	2,76
CF_Plate_6	5,54	3349,30	2,58
CF_Plate_9	5,04	3399,55	2,20
CF_Plate_10	4,75	3394,25	2,11
CF_Plate_7	4,50	3005,55	1,88
CF_Plate_8	4,00	3088,42	1,18

Na curva força – tempo da Figura 113, referente ao laminado denominado de “CF_Plate_1”, é visível uma diminuição acentuada da força de contacto, após esta ter atingido os cerca de 4 kN. Isto permite dizer que, o laminado sofreu danos significativos durante o ensaio. A curva energia – tempo (ver Figura 114) relativa ao mesmo laminado revela que, após atingida a energia de impacto máxima, não houve dissipação de energia. Isto leva a afirmar que, o impactor embateu na amostra e perfurou-a totalmente, o que está de acordo com a inspeção visual, tal como mostra a Figura 117. A duração deste impacto foi de 13,9 ms e a força máxima atingida foi de 4,2 kN.

Nos historiais de força de contacto da Figura 113, alusivos aos laminados que sofreram impactos de energia entre 4,5 J e 10 J, também se observaram diminuições bruscas da força de contacto, pelo que, também ocorreram danos significativos nesses provetes. A análise UT dos laminados, após os ensaios de impacto, revelou a existência do dano de delaminação (ver Figuras 119 (b) a 125 (b)).

A curva força – tempo da figura 113, relativa ao laminado denominado de “CF_Plate_8”, apresenta poucas oscilações, não havendo nenhuma indicação visível de que o impacto de energia

4 J tenha provocado danos no provete. A análise UT também não revelou a presença de danos, tal como apresenta a Figura 126 (b).

Conforme se pode observar na Figura 114, as curvas energia – tempo referentes às placas que sofreram impactos de energia entre 4 J e 10 J, mostram que estas solicitações não foram suficientes para provocar a penetração total do impactor. Após atingida a energia de impacto máxima, ocorreu a conversão desta em energia de deformação elástica e depois a sua dissipação.

4.3.2.1. Inspeção visual

Pretendeu-se caracterizar o dano induzido nos laminados de carbono/epóxico, pelo que, estes foram avaliados por inspeção visual. Analisou-se a superfície frontal (zona de impacto) e oposta dos provetes, através do recurso a um microscópio ótico. As Figuras 115 a 117 mostram o estado das placas após os ensaios de impacto.

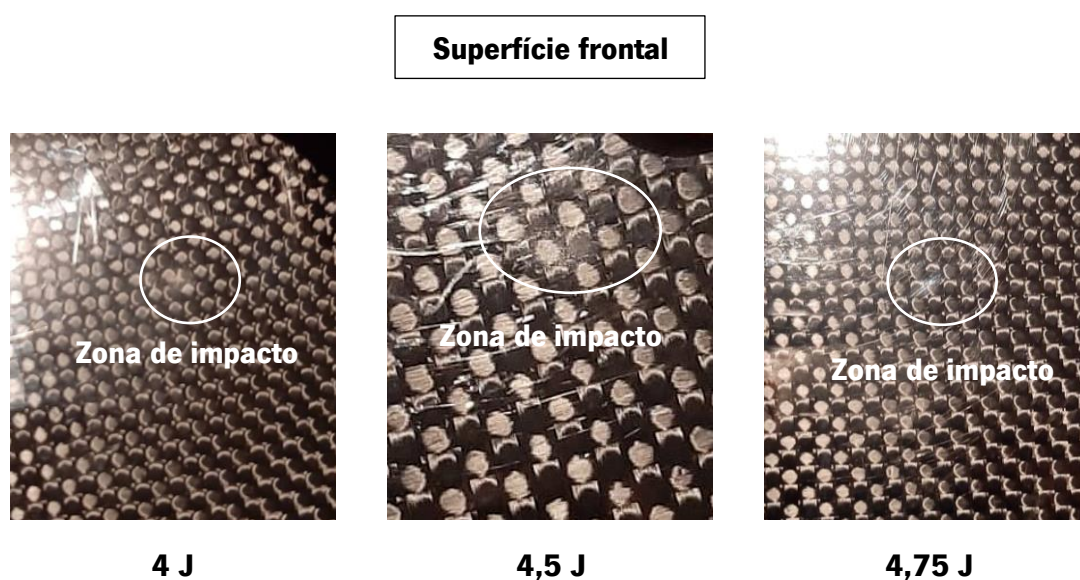


Figura 115: Superfície frontal dos laminados submetidos aos impactos de energia 4 J, 4,5 J e 4,75 J.

Superfície frontal

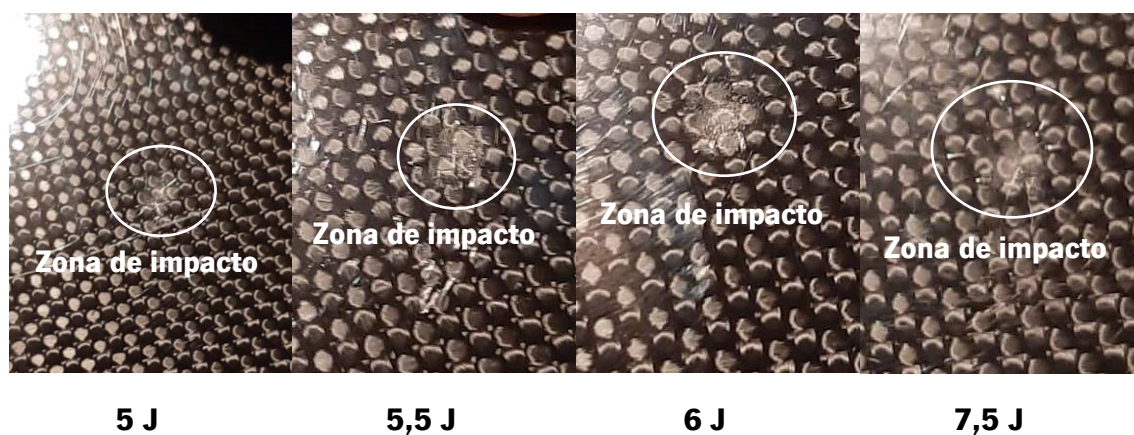
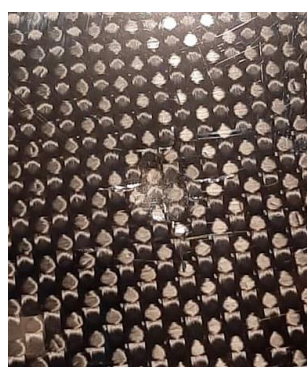


Figura 116: Superfície frontal dos laminados submetidos aos impactos de energia 5 J, 5,5 J, 6 J e 7,5 J.

Superfície frontal



10 J



80,3 J

Superfície oposta



10 J



80,3 J

Figura 117: Superfície frontal e oposta dos laminados submetidos aos impactos de energia 10 J e 80,3 J.

Como os laminados de carbono/epóxico não são compósitos translúcidos, o dano de delaminação não pode ser observado a olho nu. Contudo, alguns tipos de dano podem ser identificados como fissuração da matriz e indentação superficial, com o recurso a um microscópio ótico e ao sentido do tacto, respetivamente. A Figura 117 mostra que o impacto de energia 80,3 J causou a rotura da matriz e das fibras, sendo visível na face frontal da placa, a presença de quatro fissuras na matriz orientadas segundo as direções 0° e 90°. Na superfície oposta do laminado é possível observar uma área de delaminação em forma de losango, assim como, rotura de fibras (ver Figura 117).

As solicitações de impacto de energia 4,5 J a 10 J, originaram na superfície frontal dos provetes, pequenas fissuras na matriz de epóxico (ver Figuras 115 a 118), verificando-se um aumento da indentação superficial com o aumento da energia de impacto. De referir que, o impacto de energia 10 J gerou na face oposta do laminado, uma pequena saliência, sendo visível uma fissura na matriz (ver Figura 117). Não se identificaram fissuras na superfície frontal do laminado submetido ao impacto de energia 4 J (ver Figura 115).

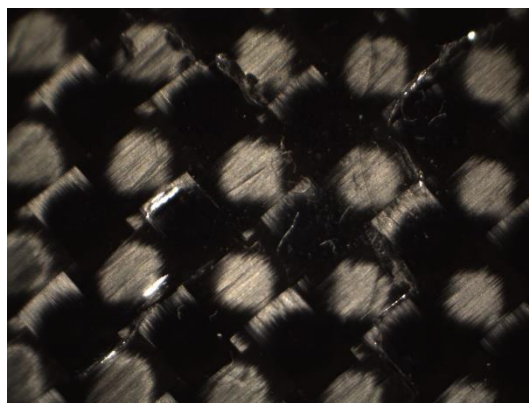


Figura 118: Visualização das fissuras matriciais presentes no laminado CF_Plate_2, resultantes do impacto de energia 10 J, com o recurso a um microscópio ótico.

4.3.2.2. Análise por ultrassons

Com o intuito de caracterizar o dano induzido pelos impactos, ao longo da espessura dos laminados, foi utilizado o método de controlo de ultrassons. A integridade de cada provete foi avaliada antes e após a realização dos ensaios de impacto, tendo sido utilizada uma sonda de frequência 5 MHz. Na Tabela 35 são indicadas as velocidades de propagação obtidas para as ondas de ultrassom longitudinais e transversais, antes e após a realização dos ensaios.

Tabela 35: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais nos laminados de carbono/epóxico, antes e após a realização dos ensaios de impacto.

	Antes dos ensaios de impacto	Após os ensaios de impacto
Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais [mm/ μ s]	3,239	3,139
Velocidade de propagação das ondas de ultrassom transversais [mm/ μ s]	1,950	1,950

Segundo a Tabela 35, a velocidade de propagação das ondas longitudinais diminuiu, ligeiramente, de 3,239 mm/ μ s antes dos ensaios de impacto, para 3,139 mm/ μ s, após a realização dos ensaios. Esta diferença está relacionada com o facto, de se ter efetuado a calibração do equipamento de UT por duas vezes: uma calibração para a inspeção dos provetes antes dos ensaios de impacto e outra após a realização dos ensaios.

Nas Figuras 119 a 126 são apresentados os *scans* obtidos por UT, antes e após a realização dos ensaios de impacto.

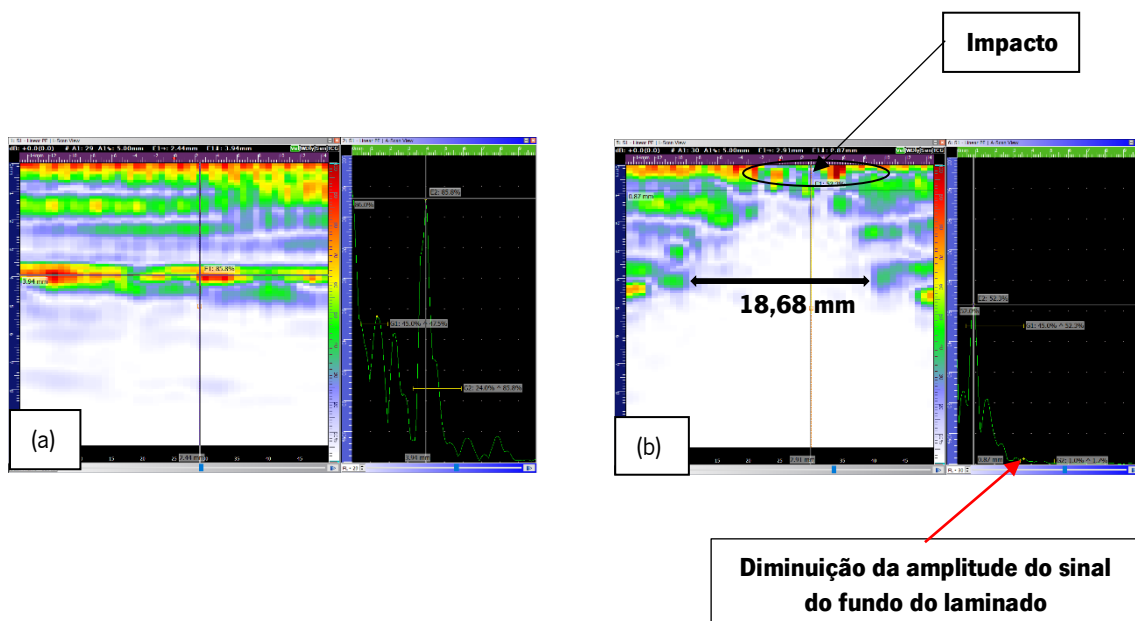


Figura 119: *Scans* relativos à amostra CF_Plate_2 – (a) antes do impacto de energia 10 J; (b) após o impacto de energia 10 J.

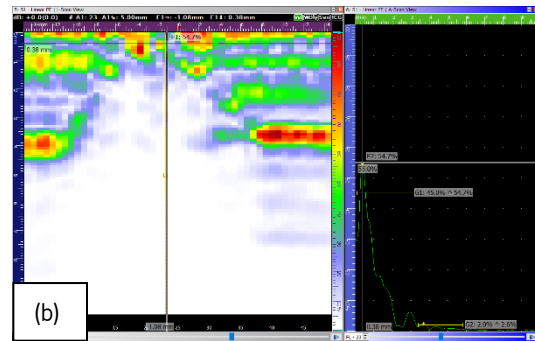
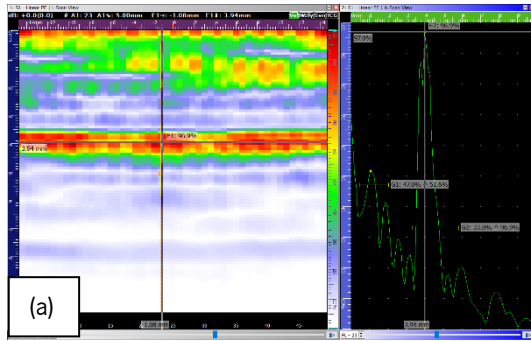


Figura 120: Scans relativos à amostra CF_Plate_4 – (a) antes do impacto de energia 7,5 J; (b) após o impacto de energia 7,5 J.

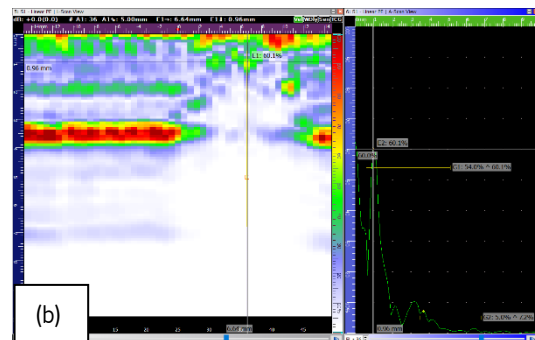
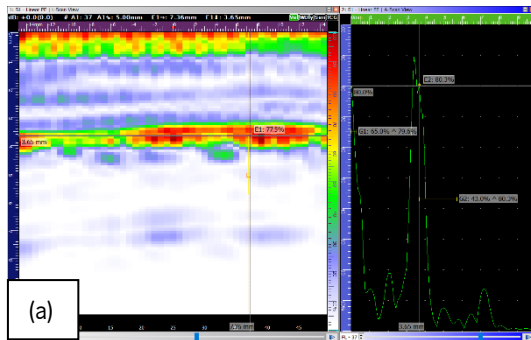


Figura 121: Scans relativos à amostra CF_Plate_5 – (a) antes do impacto de energia 6 J; (b) após o impacto de energia 6 J.

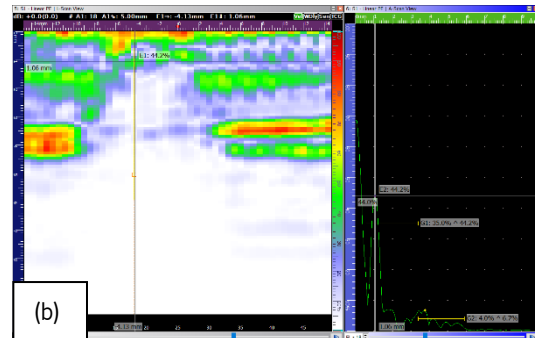
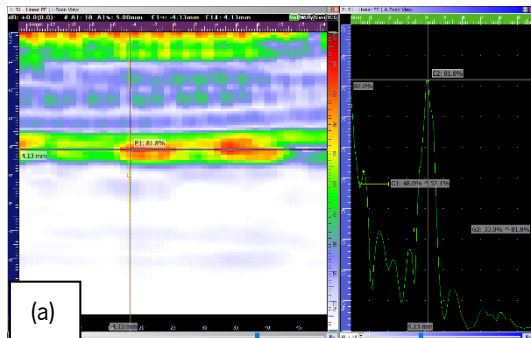


Figura 122: Scans relativos à amostra CF_Plate_6 – (a) antes do impacto de energia 5,5 J; (b) após o impacto de energia 5,5 J.

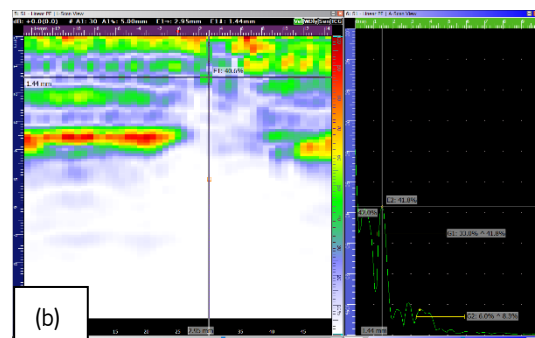
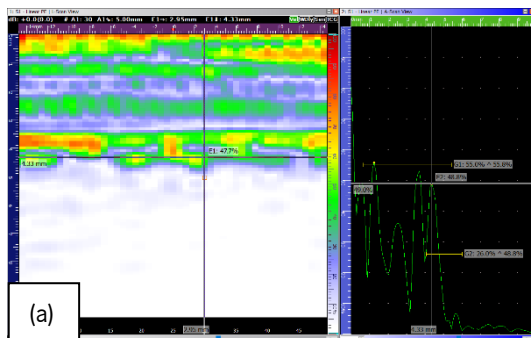


Figura 123: Scans relativos à amostra CF_Plate_9 – (a) antes do impacto de energia 5 J; (b) após o impacto de energia 5 J.

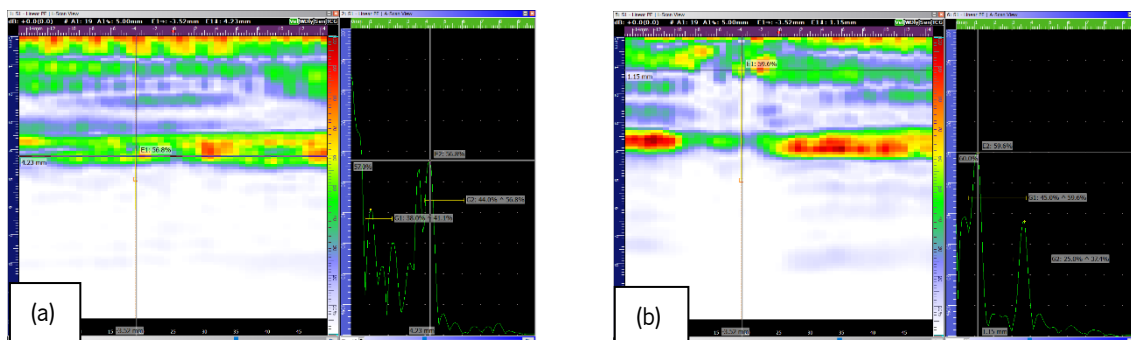


Figura 124: *Scans* relativos à amostra CF_Plate_10 – (a) antes do impacto de energia 4,75 J; (b) após o impacto de energia 4,75 J.

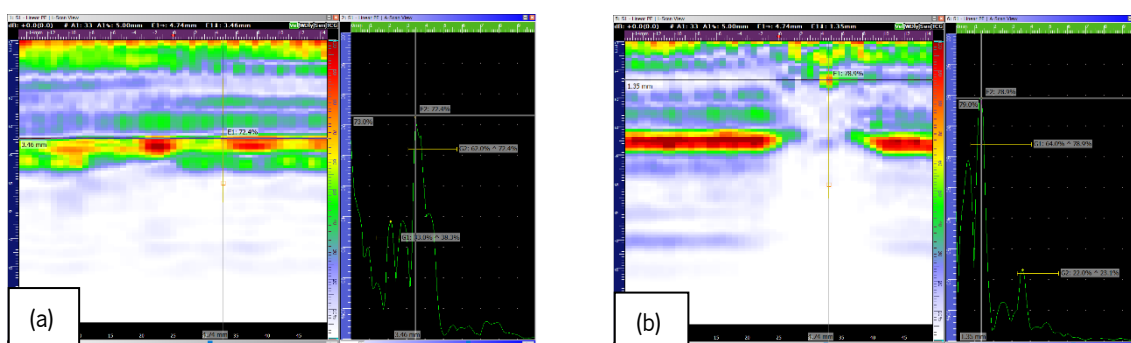


Figura 125: *Scans* relativos à amostra CF_Plate_7 – (a) antes do impacto de energia 4,5 J; (b) após o impacto de energia 4,5 J.

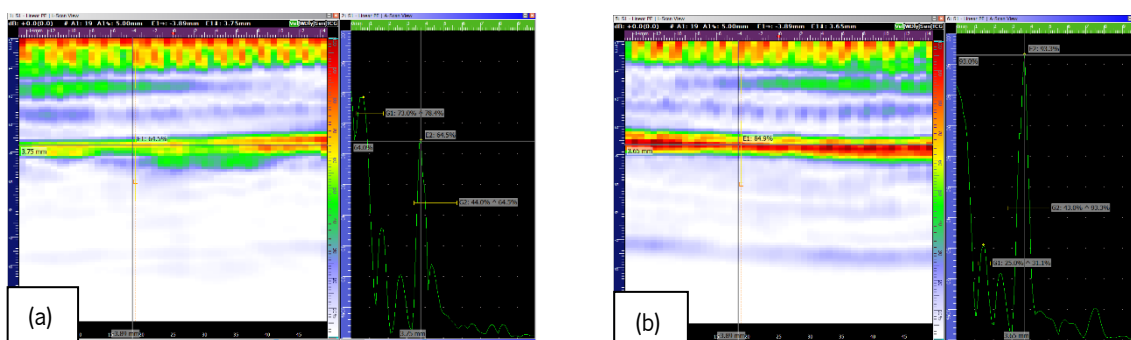


Figura 126: *Scans* relativos à amostra CF_Plate_8 – (a) antes do impacto de energia 4 J; (b) após o impacto de energia 4 J.

A avaliação UT dos laminados antes dos ensaios de impacto, não mostrou a presença de anomalias internas graves, que tenham resultado do processo de produção VARI ou defeitos devido a operações de pós-processamento como, por exemplo, o corte dos provetes (ver Figuras 119 (a) a 126 (a)).

Verificou-se na vista *L-Scan* das Figuras 119 (b) a 125 (b), que os impactos de energia 4,5 J a 10 J originaram no local de embate, a rotura dos laminados (rotura da matriz e/ou rotura de fibras de carbono), resultando na descontinuidade do material e, por conseguinte do sinal de ultrassons.

Para o impacto de energia 4 J não foram detetados danos, ao longo da espessura do laminado. Não se observou uma diminuição/falha quer do sinal à superfície quer do sinal relativo à face oposta da placa (ver Figura 126 (b)). Contudo, é necessário mencionar que, caso exista algum dano, provavelmente, o tamanho deste estava abaixo do limite de deteção do equipamento de ultrassons utilizado.

Conforme se pode observar na representação *L-Scan* das Figuras 119 (b) a 125 (b), nos provetes sujeitos aos impactos de energia entre 4,5 J e 10 J, as delaminações parecem surgir como falhas no sinal de UT (sem sinal ou com diminuição significativa do sinal), junto à superfície de impacto. Como a área de dano constitui um meio não contínuo, as ondas sonoras não se propagaram, resultando na inexistência de sinal do fundo do laminado. Para além disso, também se pode observar que, as solicitações de impacto provocaram nos laminados, um dano de formato cónico, verificando-se um fenómeno de crescimento das delaminações ao longo da espessura, à medida que a distância à superfície solicitada aumentou [3].

A partir da técnica de UT foi possível determinar o comprimento máximo do dano cónico. Para a obtenção deste comprimento, aplicou-se o mesmo método de medição, utilizado na análise do dano de impacto nas placas de fibra de vidro/epóxico. Na Figura 127 e Tabela 36 é apresentada a variação do comprimento do dano cónico obtido por UT, em função da energia de impacto. Além disso, a Tabela 36 também mostra a variação do comprimento do dano com a energia absorvida.

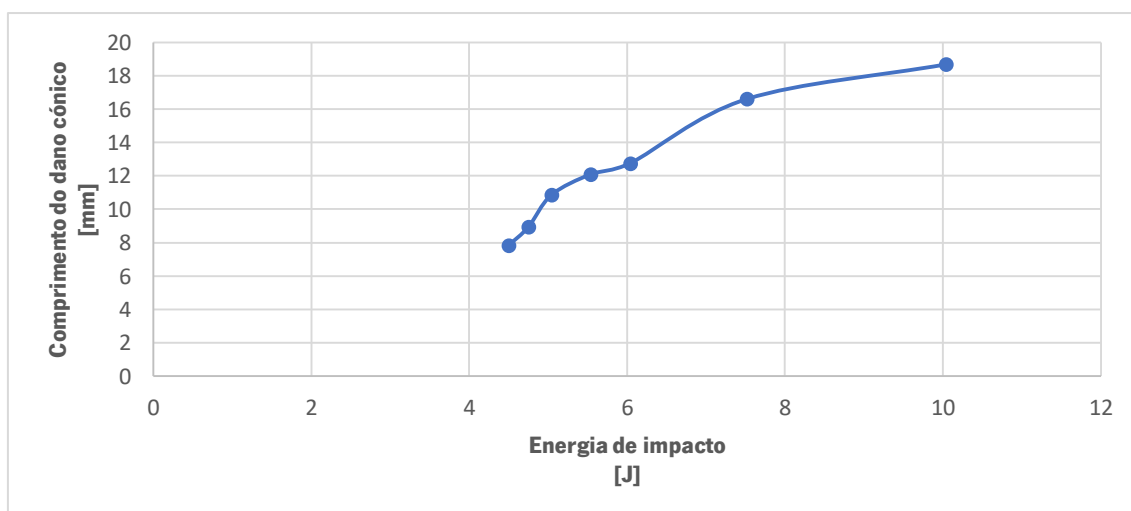


Figura 127: Variação do comprimento do dano cónico em função da energia de impacto.

Tabela 36: Comprimento do dano cónico dado por UT, em função da energia de impacto e da energia absorvida.

Designação das amostras	Energia de impacto [J]	Comprimento máximo do dano cónico [mm]	Energia absorvida [J]
CF_Plate_2	10,04	18,68	6,44
CF_Plate_4	7,52	16,61	3,85
CF_Plate_5	6,04	12,76	2,76
CF_Plate_6	5,54	12,10	2,58
CF_Plate_9	5,04	10,85	2,20
CF_Plate_10	4,75	8,94	2,11
CF_Plate_7	4,50	7,84	1,88
CF_Plate_8	4,00	-	1,18

Os resultados apresentados na Figura 127 e Tabela 36 evidenciam uma correlação entre a energia de impacto e a extensão do dano, ou seja, o comprimento do dano foi tanto maior quanto maior foi a energia de impacto. Isto resulta do facto de quanto maior for a energia de impacto, maior é o nível de energia absorvida pelo laminado, resultando assim, numa maior deformação e, por conseguinte num dano de maior tamanho. No que concerne à altura do dano (ao longo da espessura), a vista *L-Scan* das Figuras 119 (b) a 125 (b) indicia que, o dano resultante dos impactos de energia 4,5 J a 10 J, atingiu toda a espessura dos laminados.

4.4. Caracterização do dano induzido por ação de solicitações de flexão em laminados de fibra de vidro/epóxico

Os provetes de laminados de fibra de vidro com matriz termoendurecível de epóxico foram solicitados à flexão em três pontos. A Figura 128 ilustra as curvas força – deslocamento obtidas para os provetes ensaiados. A Tabela 37 apresenta os resultados experimentais, em termos de força aplicada e deformação resultante.

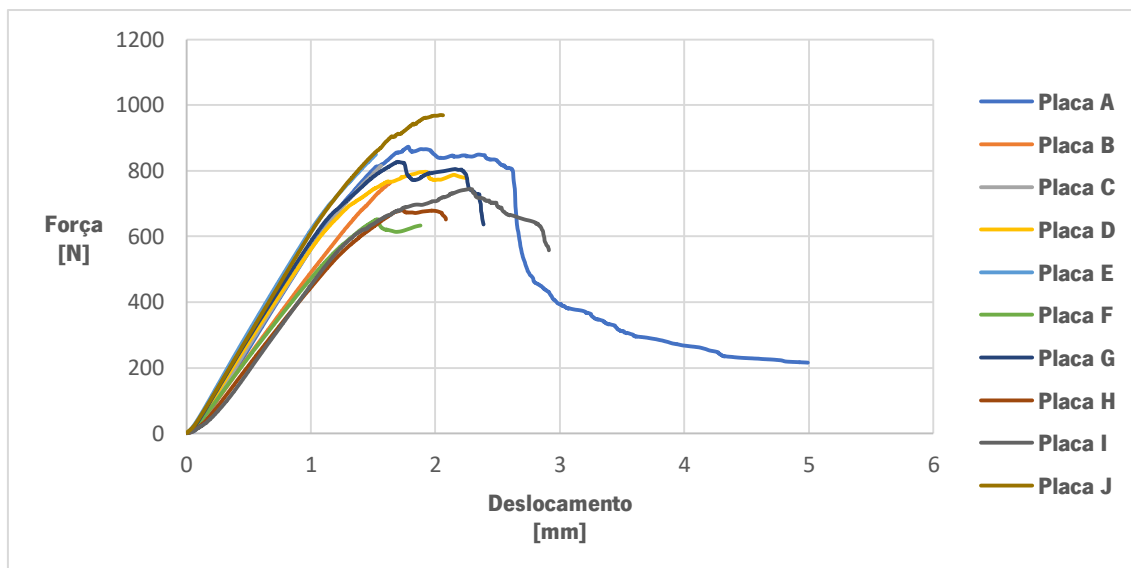


Figura 128: Gráfico força (N) – deslocamento (mm) relativo aos provetes submetidos aos ensaios de flexão em três pontos.

Tabela 37: Resultados experimentais obtidos para os provetes sujeitos aos ensaios de flexão.

Designação das amostras	Espessura [mm]	Força aplicada [N]	Deformação resultante [mm]
Placa F	2,48 ± 0,04	651,78	1,53
Placa H	2,47 ± 0,01	679,80	1,73
Placa I	2,66 ± 0,01	744,30	2,28
Placa B	2,62 ± 0,12	763,64	1,64
Placa D	2,80 ± 0,01	796,65	1,92
Placa C	2,79 ± 0,04	814,87	1,56
Placa G	2,84 ± 0,02	827,11	1,70
Placa E	2,79 ± 0,05	849,44	1,52
Placa A	2,86 ± 0,02	873,10	1,78
Placa J	2,87 ± 0,05	969,54	2,05

Conforme se pode observar na Figura 128, todas as curvas força – deslocamento apresentam uma linearidade desde o início do ensaio até um certo deslocamento. Depois, é evidente que estas deixam de ser lineares, indicando a existência de danos nos provetes.

A Tabela 37 mostra que, os laminados foram submetidos a cargas entre 651,8 N e 969,5 N. Em todos os provetes foram induzidos danos, tendo-se apenas verificado a rotura total para a amostra denominada de “Placa A” (ver Figuras 129 e 130). Neste provete, a força de rotura foi de 873,1 N, sendo o deslocamento de 1,78 mm. Ainda na Tabela 37, é perceptível a não existência de uma correlação entre a força aplicada e a deformação resultante. Uma explicação para isto baseia-se no facto de os provetes apresentarem bolhas, decorrentes do processo de produção VARI, assim como, pequenas variações na espessura, afetando assim os resultados obtidos a partir dos ensaios.

4.4.1. Inspeção visual

De modo a caracterizar o dano induzido nas amostras, as suas faces frontais e opostas foram avaliadas por inspeção visual. As Figuras 129 e 130 apresentam a superfície frontal e traseira dos laminados, após os ensaios de flexão.

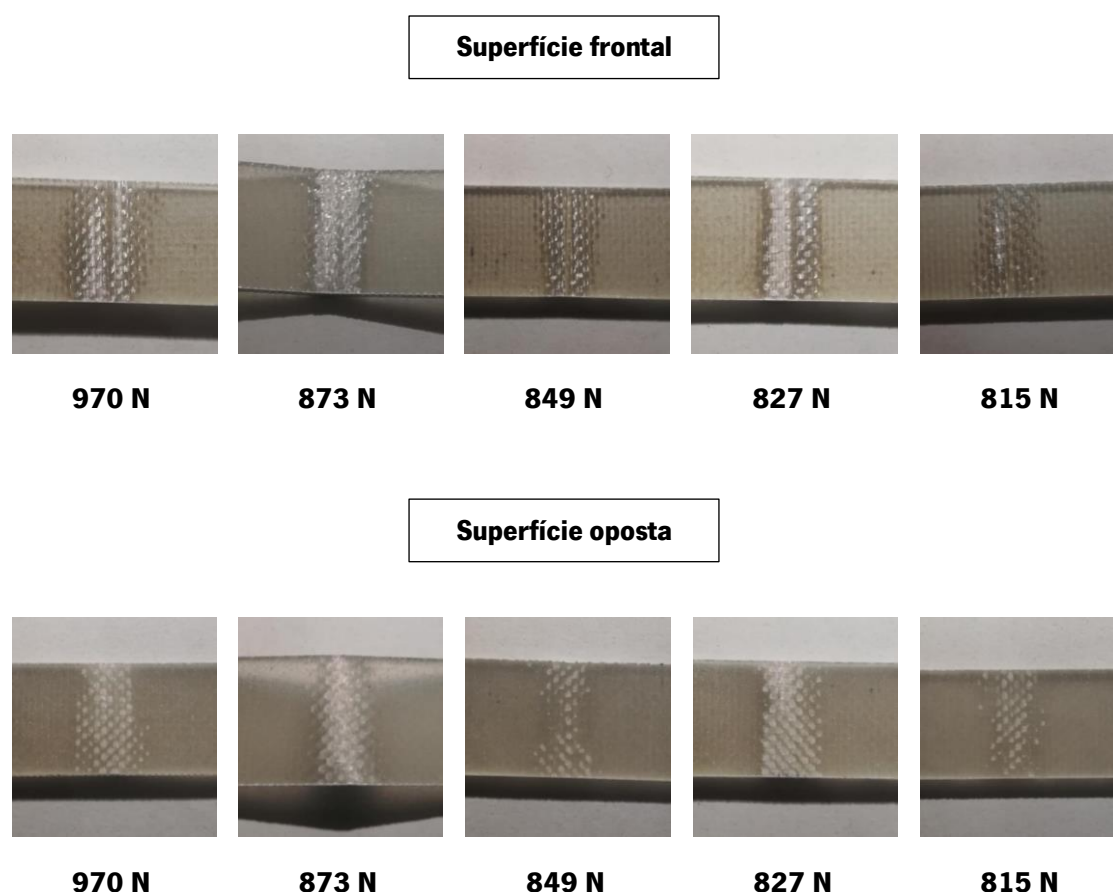


Figura 129: Evolução do dano nos laminados de fibra de vidro/epóxico submetidos a cargas entre 815 N e 970 N.

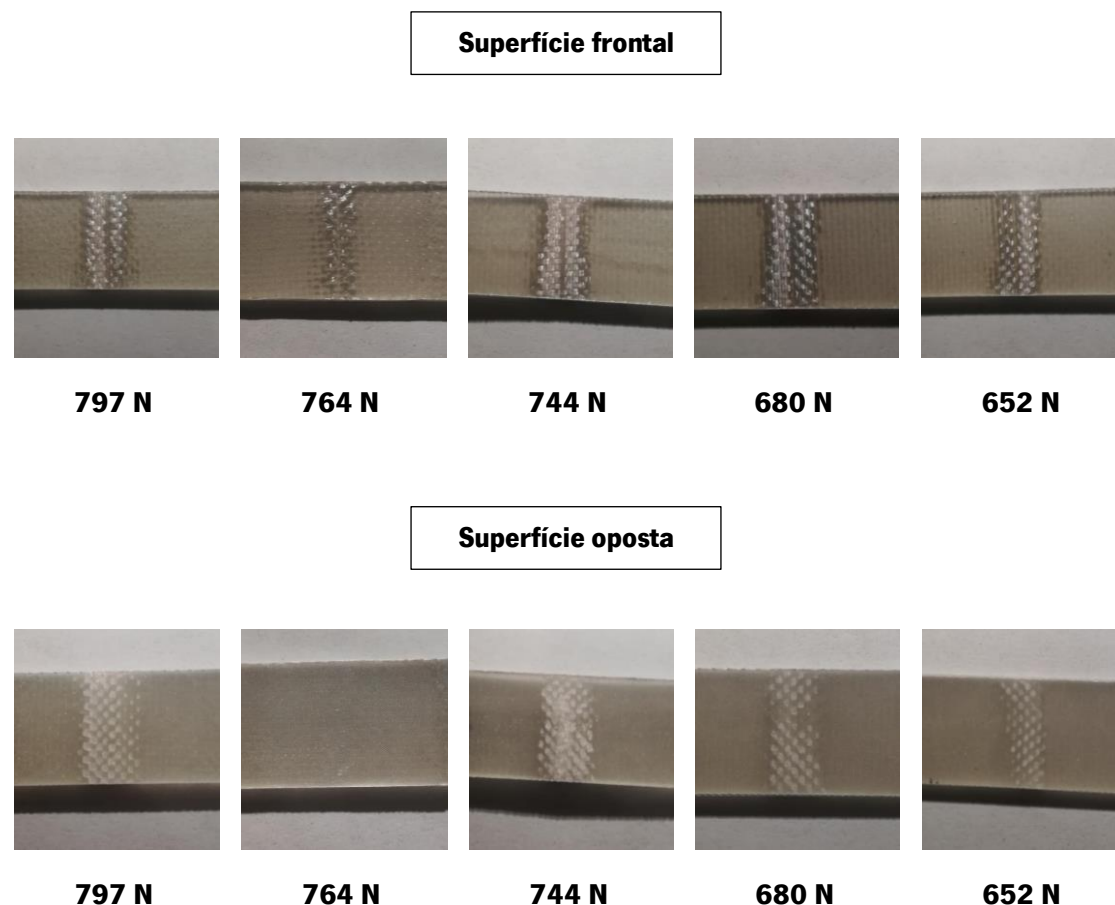


Figura 130: Evolução do dano nos laminados de fibra de vidro/epóxico sujeitos a cargas entre 652 N e 797 N.

Durante o ensaio de flexão ocorreu compressão nas lâminas junto à região de contacto do rolete de carregamento. Por esse motivo, os laminados apresentaram na sua superfície frontal, danos locais como indentação superficial, quebra da matriz sem rotura de fibras e delaminação (ver Figuras 129 e 130). Por outro lado, as lâminas junto à superfície oposta foram solicitadas à tração, verificando-se para forças suficientes, rotura das fibras e da matriz. Tal comportamento ocorreu nos provetes submetidos às cargas de 744 N, 827 N e 873 N. De referir que, o laminado sujeito à força de 764 N (“Placa B”) não apresentou na sua superfície oposta, danos locais de tração, como se pode observar na Figura 130.

Não foi verificada uma correlação entre a força aplicada e a severidade dos danos. Por exemplo, comparando as duas placas submetidas às forças de 652 N (“Placa F”) e 764 N (“Placa B”), é evidente que a carga de 652 N causou na “Placa F”, um dano muito mais extenso, do que a carga de 764 N na “Placa B”.

4.4.2. Inspeção por ultrassons

Com o intuito de analisar o dano causado pela ação de solicitações de flexão, ao longo da espessura dos laminados, utilizou-se o método de ultrassons. A integridade de cada provete foi avaliada antes e após a realização dos ensaios de flexão, tendo sido usada uma sonda de frequência 5 MHz. Na Tabela 38 são indicadas as velocidades de propagação obtidas para as ondas de ultrassom longitudinais e transversais, antes e após a realização dos ensaios.

Tabela 38: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais nos provetes de fibra de vidro/epóxico, antes e após a realização dos ensaios de flexão.

	Antes dos ensaios de flexão	Após os ensaios de flexão
Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais [mm/ μ s]	2,912	3,154
Velocidade de propagação das ondas de ultrassom transversais [mm/ μ s]	1,950	1,950

A Tabela 38 mostra que, a velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais aumentou, ligeiramente, de 2,912 mm/ μ s antes dos ensaios de flexão, para 3,154 mm/ μ s, após a realização dos ensaios. Esta diferença de velocidades resultou do facto, de se ter efetuado a calibração do equipamento de UT por duas vezes: uma calibração para a inspeção dos provetes antes dos ensaios de flexão e outra após a realização dos ensaios.

Nas Figuras 131 a 139 são apresentados os resultados obtidos da análise UT dos provetes, antes e após a realização dos ensaios de flexão.

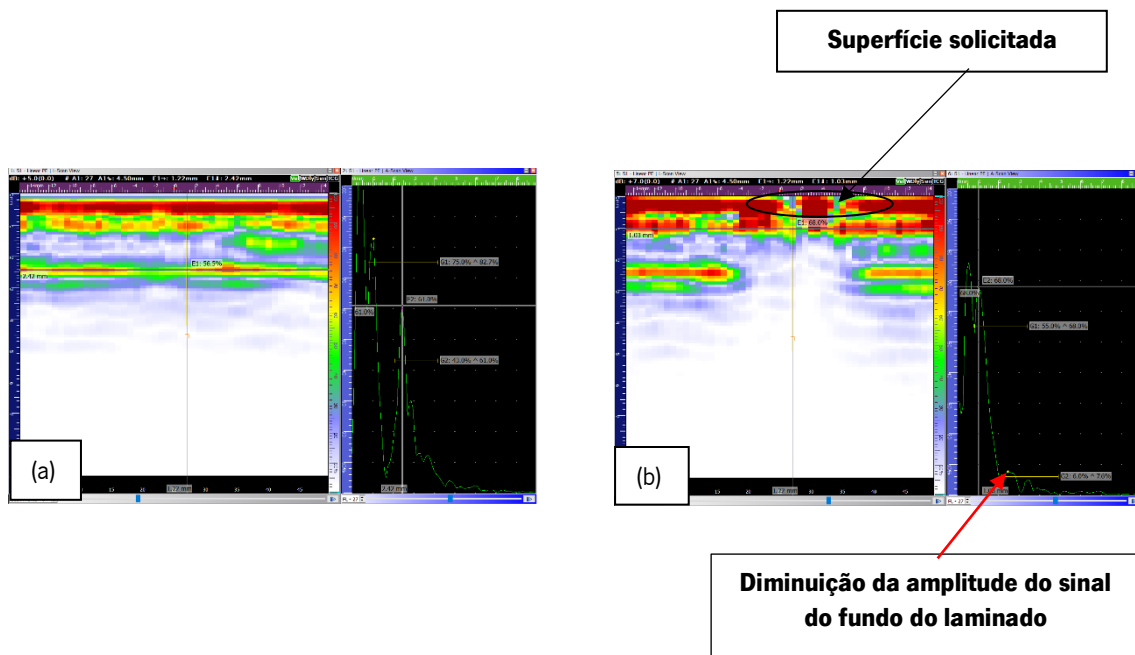


Figura 131: Scans relativos à amostra Placa F – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 652 N.

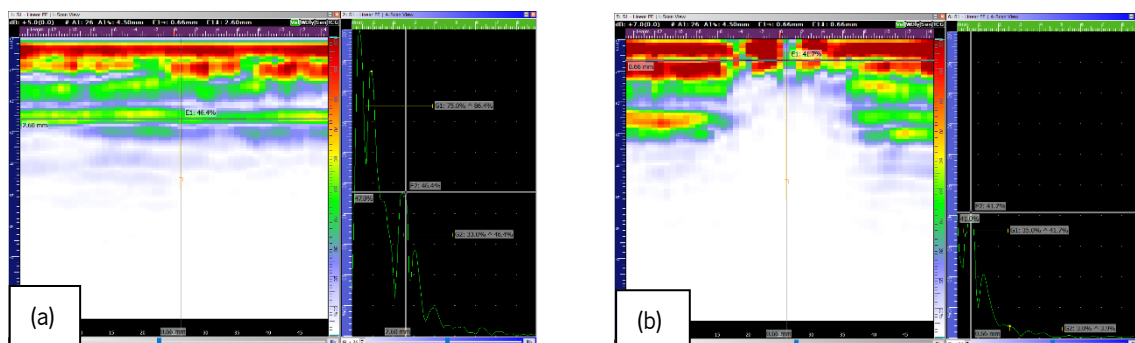


Figura 132: Scans relativos à amostra Placa H – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 680 N.

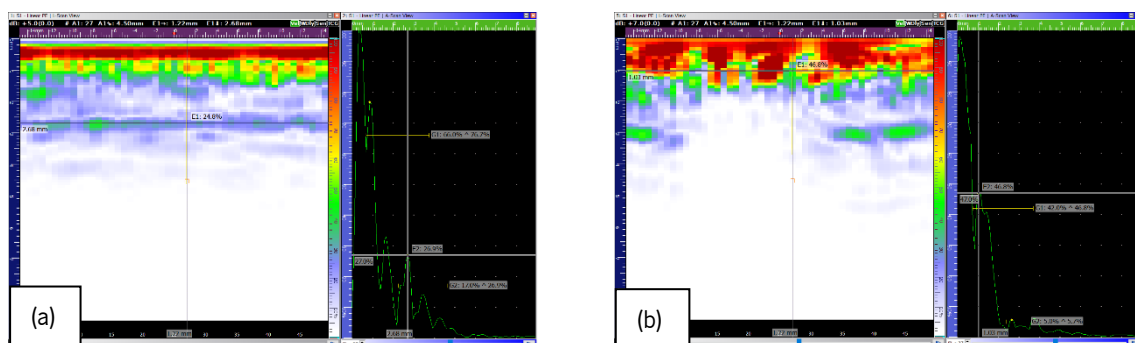


Figura 133: Scans relativos à amostra Placa I – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 744 N.

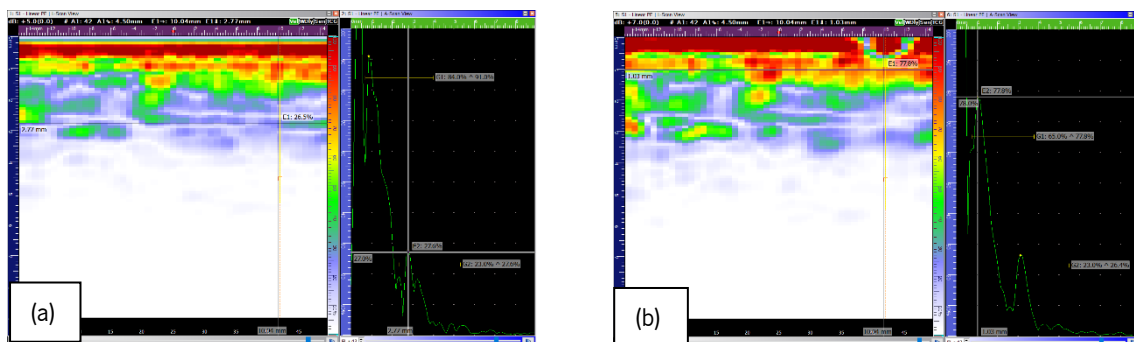


Figura 134: Scans relativos à amostra Placa B – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 764 N.

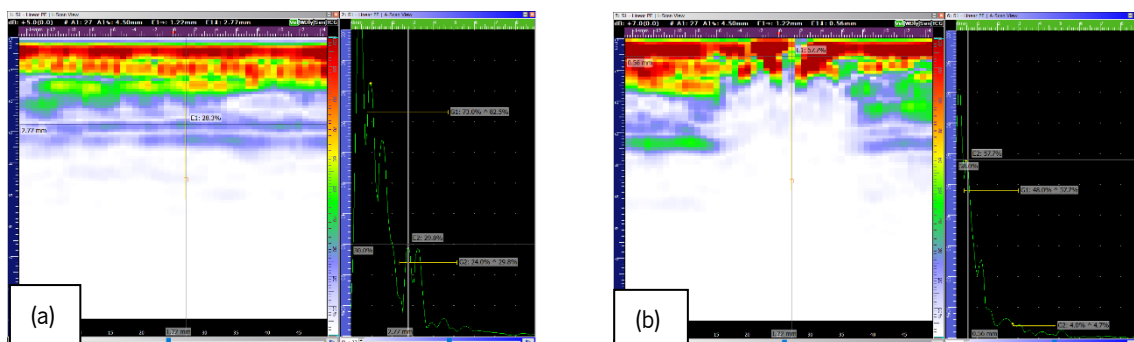


Figura 135: Scans relativos à amostra Placa D – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 797 N.

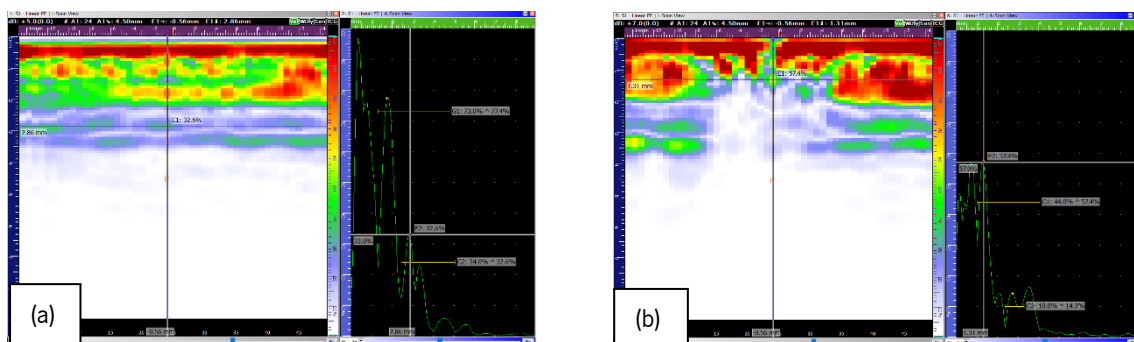


Figura 136: Scans relativos à amostra Placa C – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 815 N.

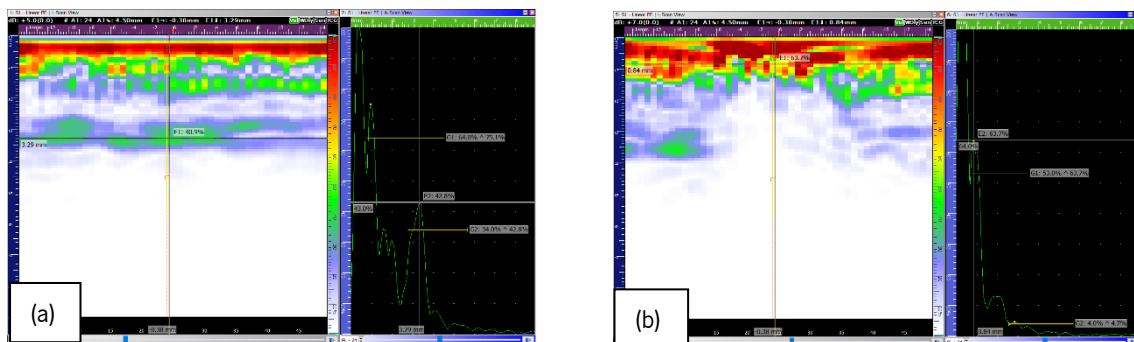


Figura 137: Scans relativos à amostra Placa G – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 827 N.

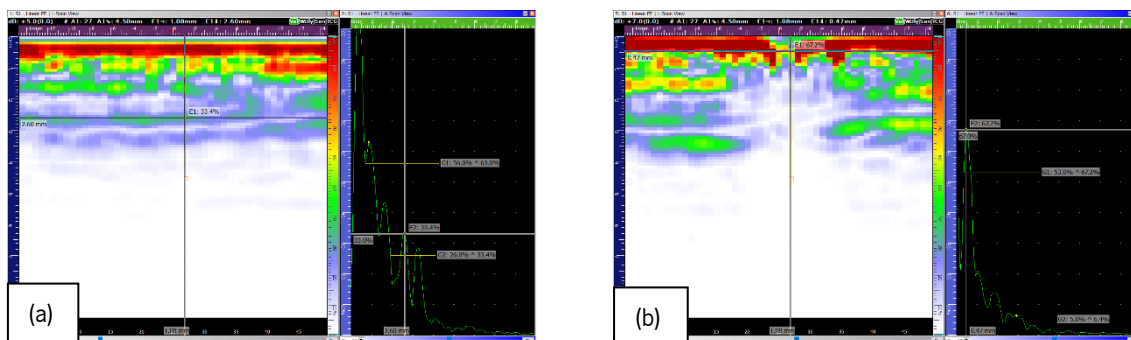


Figura 138: Scans relativos à amostra Placa E – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 849 N.

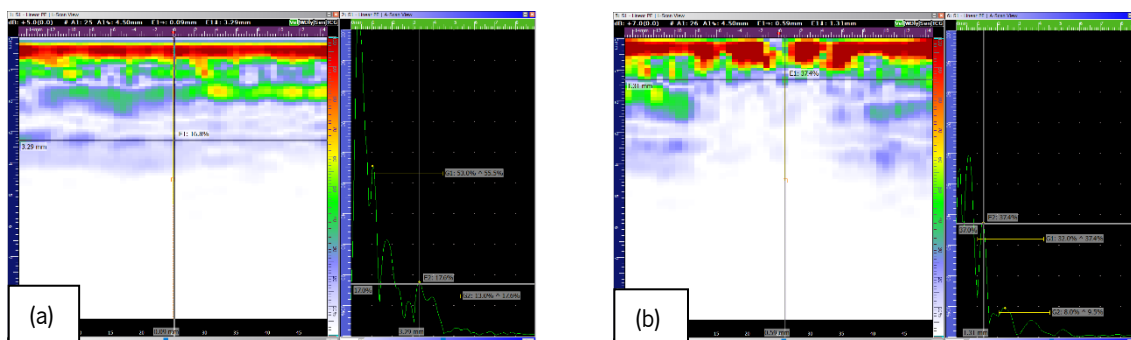


Figura 139: Scans relativos à amostra Placa J – (a) antes do ensaio de flexão; (b) após ensaio de flexão em que o provete foi sujeito a uma força de 970 N.

A análise UT dos provetes antes dos ensaios de flexão, não mostrou a presença de anomalias internas graves, que tenham resultado do processo de produção VARI ou defeitos/danos devido a operações de pós-processamento como, por exemplo, o corte dos provetes (ver Figuras 131 (a) e 139 (a)).

Segundo as vistas *A-Scan* e *L-Scan* das Figuras 131 (b) a 139 (b), verificou-se que a compressão exercida pelo rolete de carregamento causou a rotura da matriz de epóxico, resultando na descontinuidade do material e, consequentemente, do sinal de ultrassons.

Conforme se pode observar na vista *L-Scan* das Figuras 131 (b) a 139 (b), excluindo o provete denominado de “Placa B”, as delaminações parecem surgir como falhas no sinal de UT (sem sinal ou com diminuição significativa do sinal), junto à superfície de carregamento. Como a área de dano constitui um meio não contínuo, as ondas sonoras não se propagaram, resultando na inexistência de sinal relativo à face oposta do laminado. Para além disso, também é possível observar que, as solicitações de flexão provocaram nos provetes, um dano de formato cónico, verificando-se a tendência para o seu crescimento, ao longo da espessura, à medida que a distância à superfície solicitada aumentou [3].

As fissuras matriciais e a delaminação observadas por inspeção visual e ultrassons estão interligadas. A quebra da matriz resulta das tensões de flexão, que se propagam até às interfaces entre camadas, causando o aparecimento de delaminação [4].

A partir da técnica de UT foi possível determinar o comprimento máximo do dano cónico. Para a obtenção deste comprimento, aplicou-se o mesmo método de medição, utilizado na análise do dano de impacto nas placas de fibra de vidro/epóxico e de carbono/epóxico. A Figura 140 e Tabela 46 do Anexo H apresentam a variação do comprimento do dano cónico obtido por UT, em função da força aplicada.

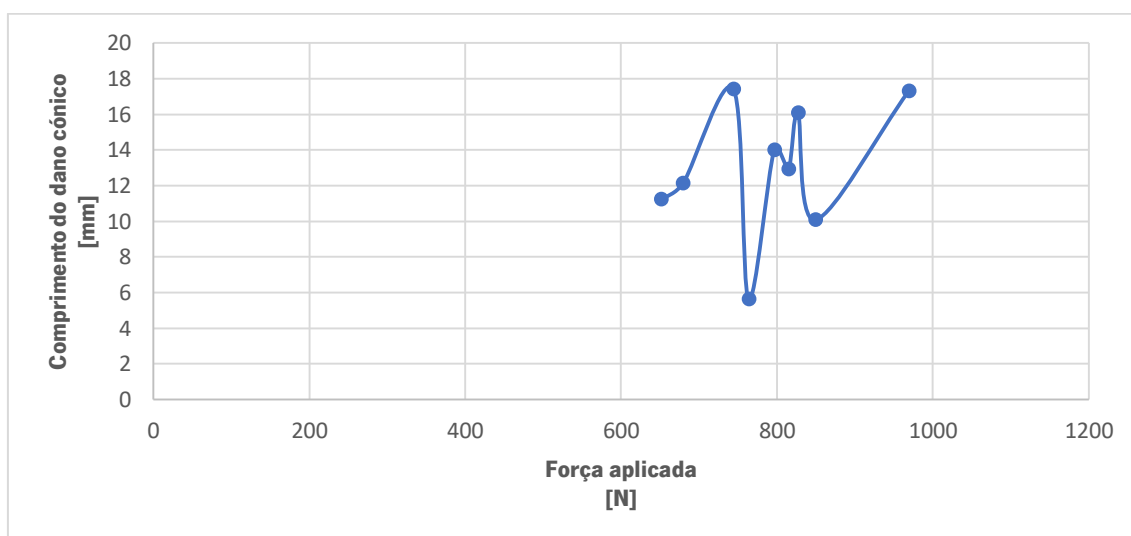


Figura 140: Variação do comprimento do dano cónico em função da força aplicada.

Segundo os resultados apresentados na Figura 140, não se verifica uma correlação entre a força aplicada e a extensão do dano.

Em relação à altura do dano (ao longo da espessura), as Figuras 131 (b) a 139 (b), excluindo o provete “Placa B”, indiciam que o dano causado pelas cargas de 652 N a 970 N, atingiu toda a espessura dos provetes.

4.5. Caracterização do dano induzido por ação de solicitações de tração em juntas adesivas de sobreposição simples

Nas Figuras 141 e 142 encontram-se representadas as curvas força – deslocamento obtidas a partir dos ensaios de tração, para as juntas de área de sobreposição de $50 \times 25,5 \text{ mm}^2$ e $25 \times 25,5 \text{ mm}^2$, respetivamente. A Tabela 39 resume os resultados experimentais apresentados nos gráficos das Figuras 141 e 142, em termos de força máxima aplicada e deformação na carga máxima.

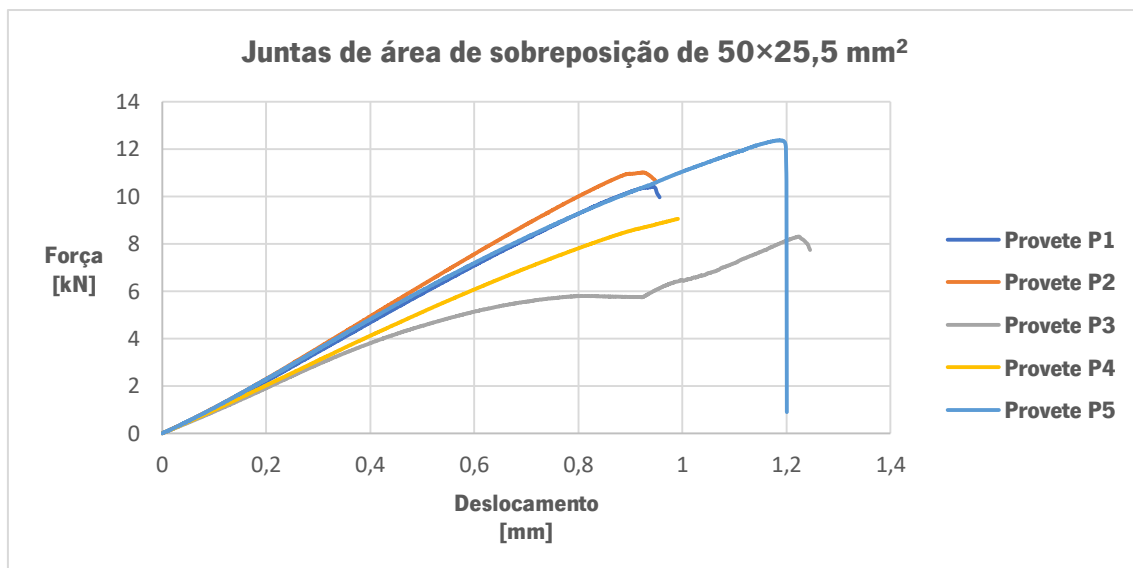


Figura 141: Curvas força (kN) – deslocamento (mm) relativas às juntas de área de sobreposição $50 \times 25,5 \text{ mm}^2$.

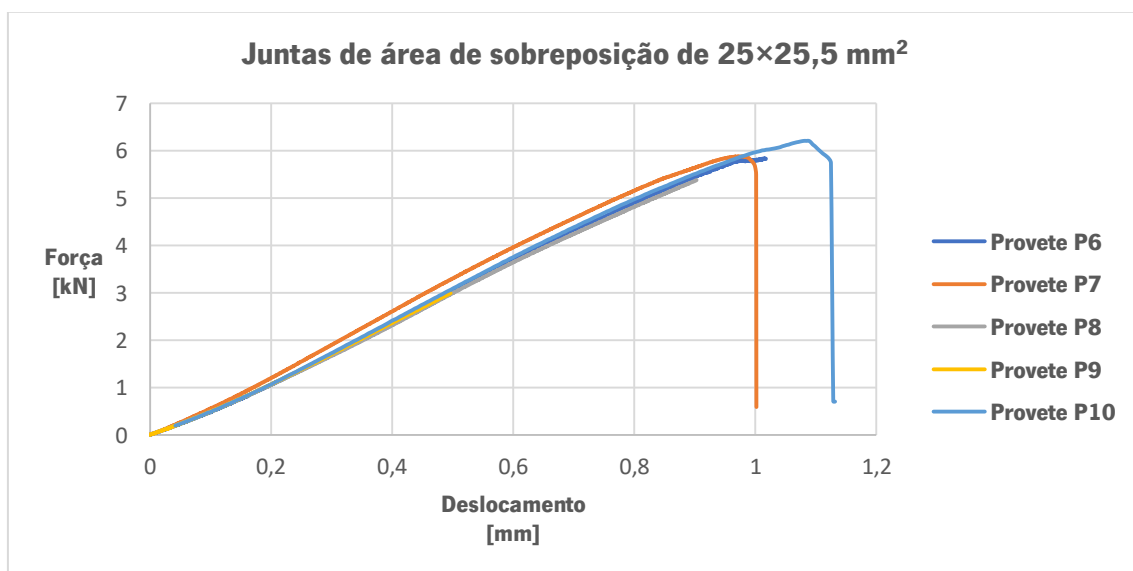


Figura 142: Curvas força (kN) – deslocamento (mm) referentes às juntas de área de sobreposição $25 \times 25,5 \text{ mm}^2$.

Tabela 39: Resultados experimentais obtidos para as juntas de área de sobreposição de 50×25,5 mm² e 25×25,5 mm².

Área de sobreposição das juntas [mm ²]	Designação dos provetes	Força máxima aplicada [kN]	Deslocamento na força máxima [mm]
50×25,5	P1	10,46	0,94
	P2	11,02	0,92
	P3	8,31	1,22
	P4	9,06	0,99
	P5	12,37	1,19
25×25,5	P6	5,84	1,01
	P7	5,89	0,97
	P8	5,39	0,90
	P9	3,00	0,50
	P10	6,21	1,08

Na Figura 141 pode-se observar que, as curvas força – deslocamento referentes às juntas P1 a P5, demonstram um comportamento linear desde o início do ensaio até um deslocamento de aproximadamente 0,3 mm. A partir daqui, é perceptível a não linearidade das curvas força – deslocamento relativas aos provetes P3 e P4, sendo esta atribuída ao escorregamento entre as garras do dispositivo de ensaios e o provete. De referir que, nestes dois provetes não se verificou a rotura total, tendo-se induzido dano nas extremidades das juntas, tal como mostra a Figura 144. Nos provetes P1, P2 e P5 ocorreu a rotura (ver Figura 143), tendo-se registado neste último, a maior força de rotura dos ensaios, que foi de 12,37 kN.

Na Figura 142 é evidente a linearidade das curvas força – deslocamento, relativas aos provetes de área de sobreposição de 25×25,5 mm², desde o início do ensaio até se atingir a força máxima. De mencionar que, apenas as juntas P7 e P10 sofreram a rotura total (ver Figura 145), sendo a maior força de rotura registada de 6,21 kN.

Notou-se que o adesivo estrutural de epóxico *Elantas Elan-tech® AS 89.1/ AW 89.2 – ADH 891.892* tem um comportamento frágil, sendo isto evidente nos provetes P5, P7 e P10, pois ocorreu a rotura total, com uma diminuição brusca da força sem deformação plástica.

Conforme se pode visualizar na Tabela 39, verificou-se que o aumento da largura da sobreposição de 25 mm para 50 mm, mantendo o mesmo comprimento da ligação (25,5 mm), resultou num aumento da força máxima aplicada. Isto permite dizer que, a junta se tornou mais resistente, devido ao aumento da área em cada um dos extremos da zona de sobreposição, que corresponde aos locais onde o nível de tensões é mais elevado [37].

4.5.1. Inspeção visual

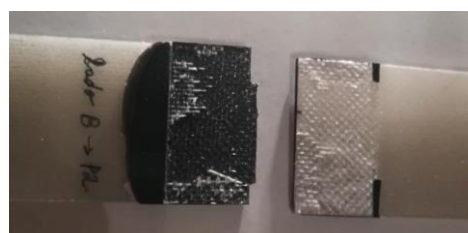
Com o objetivo de caracterizar o dano provocado nas juntas adesivas, analisou-se a superfície frontal e oposta da zona de sobreposição de cada provete, por inspeção visual. As Figuras 143 a 146 apresentam a face frontal e oposta das juntas de área de sobreposição $50 \times 25,5$ mm² e $25 \times 25,5$ mm², após os ensaios de tração.

Juntas adesivas de área de sobreposição $50 \times 25,5$ mm²

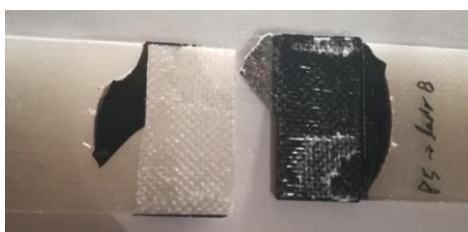
Superfícies de rotura



Junta P1 (10,46 kN)



Junta P2 (11,02 kN)



Junta P5 (12,37 kN)

Figura 143: Superfícies de rotura dos provetes P1, P2 e P5.

Juntas danificadas

Junta P3 (8,31 kN)



Lado A

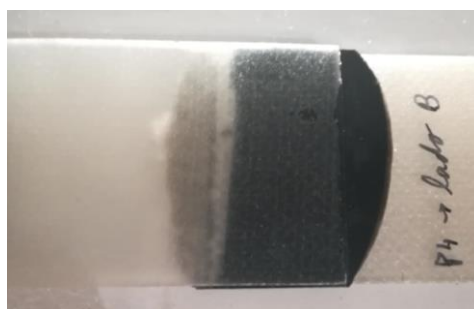


Lado B

Junta P4 (9,06 kN)



Lado A



Lado B

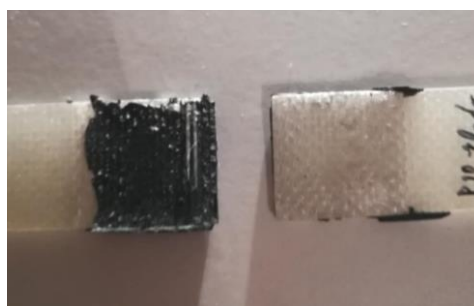
Figura 144: Provetes P3 e P4 com as suas juntas danificadas.

Juntas adesivas de área de sobreposição 25×25,5 mm²

Superfícies de rotura



Junta P7 (5,89 kN)



Junta P10 (6,21 kN)

Figura 145: Superfícies de rotura dos provetes P7 e P10.

Juntas danificadas

Junta P6 (5,84 kN)



Lado A



Lado B

Junta P8 (5,39 kN)



Lado A



Lado B

Junta P9 (3,00 kN)



Lado A



Lado B

Figura 146: Provetes P6, P8 e P9 com as suas juntas danificadas.

Nos provetes P1, P2, P5, P7 e P10, verificou-se que a rotura ocorreu na interface entre o adesivo e um dos substratos de fibra de vidro/epóxico. Isto é, a superfície de um dos substratos não apresentou resíduos de adesivo, ao passo que, a superfície de rotura do outro substrato contém adesivo, sendo visível neste a presença de fibras de vidro arrancadas (ver Figuras 143 e 145). Isto indica a ocorrência de rotura da camada superficial do laminado de fibra de

vidro/epóxico. A norma da ASTM D 5573 – 99, denomina este modo de rotura de *light-fiber-tear failure* – LFT [56]. O facto de a rotura dos substratos de fibra de vidro/epóxico ter sucedido junto à sua superfície, revela que, as propriedades de fratura desta zona do substrato são inferiores às propriedades coesivas do adesivo [37].

As Figuras 144 e 146 mostram os provetes com as suas juntas danificadas. De notar que, a rotura da junta dessas amostras se iniciou na vizinhança das extremidades do comprimento de sobreposição, devido à concentração de tensões, resultante dos esforços de tração (tensões de arrancamento) e de corte. Notou-se uma concordância entre o dano induzido nas juntas (área esbranquiçada) e a força aplicada, isto é, a extensão do dano foi tanto maior, quanto maior foi a força aplicada. Por exemplo, a carga de 5,39 kN causou um dano mais extenso na junta P8, do que a força de 3 kN no provete P9. No entanto, esta correlação não foi verificada nos provetes P3 e P4. A carga de 9,06 kN originou no provete P4, um dano menos extenso do que a força de 8,31 kN na junta P3. Isto poderá estar relacionado com a elevada concentração de bolhas nos substratos, que afetam as suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, a resistência de uma junta adesiva. Para além disso, também é necessário mencionar que o número de amostras não é suficiente para se verificar uma correlação.

4.5.2. Análise por ultrassons

Com o objetivo de avaliar a qualidade das colagens e o dano induzido, foi usado o método de UT. As juntas foram analisadas antes e após a realização dos ensaios de tração, tendo sido utilizada uma sonda de frequência 5 MHz. Na Tabela 40 são indicadas as velocidades de propagação obtidas para as ondas de ultrassom longitudinais e transversais, antes e após a realização dos ensaios.

Tabela 40: Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais e transversais nas juntas adesivas, antes e após a realização dos ensaios de tração.

Velocidade de propagação das ondas de ultrassom longitudinais [mm/μs]	Velocidade de propagação das ondas de ultrassom transversais [mm/μs]
4,455	1,950

Nas Figuras 147 a 151 são apresentados os *scans* obtidos para os provetes P1, P2, P5, P7 e P10, antes da realização dos ensaios de tração. É necessário referir que, além de se ter inspecionado a superfície frontal das juntas, também se analisou a face oposta, isto porque, a elevada atenuação não permitiu a visualização nos *scans* do sinal relativo ao fundo do substrato inferior. De mencionar que, na análise UT dos provetes de área de sobreposição 25×25,5 mm², parte da sonda ficou sobre a superfície da junta, ao passo que, a outra ficou sobre a superfície do substrato superior. Isto aconteceu devido ao facto de a sonda possuir maiores dimensões que a área de sobreposição destes provetes. Assim, o reflexo do fundo do adesivo deixa de ser visível na vista *L-Scan*, a partir de uma certa posição, tal como mostram as Figuras 150, 151, 156 (a) a 161 (a).

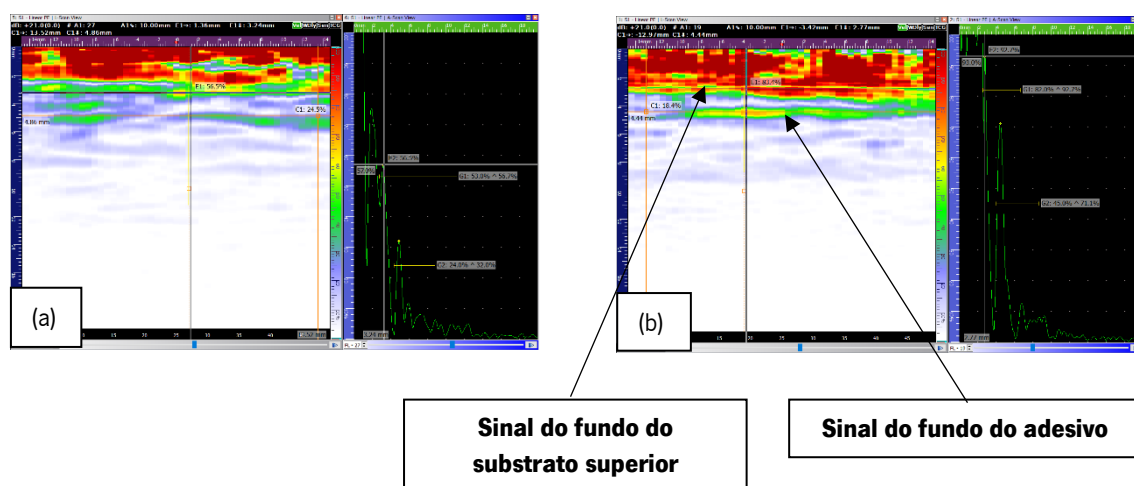


Figura 147: *Scans* relativos à junta P1 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.

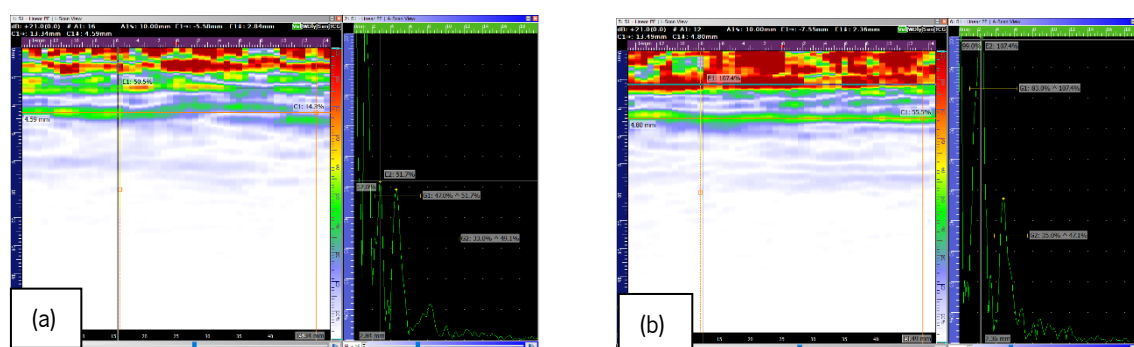


Figura 148: *Scans* relativos à junta P2 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.

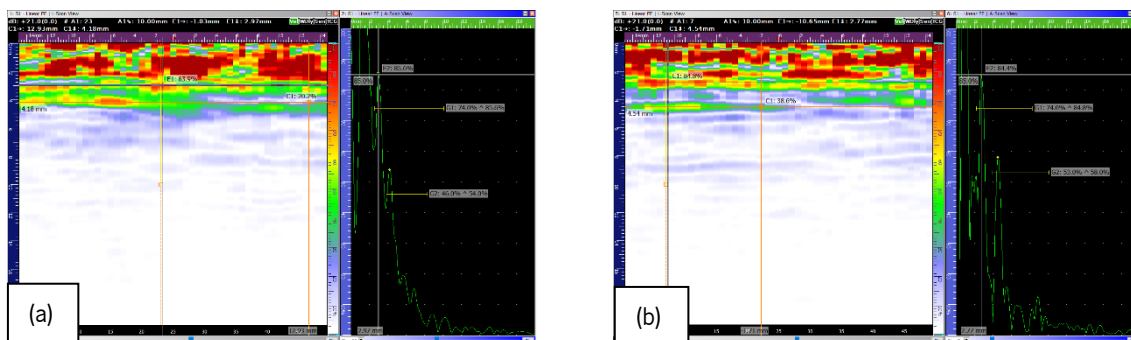


Figura 149: Scans relativos à junta P5 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.

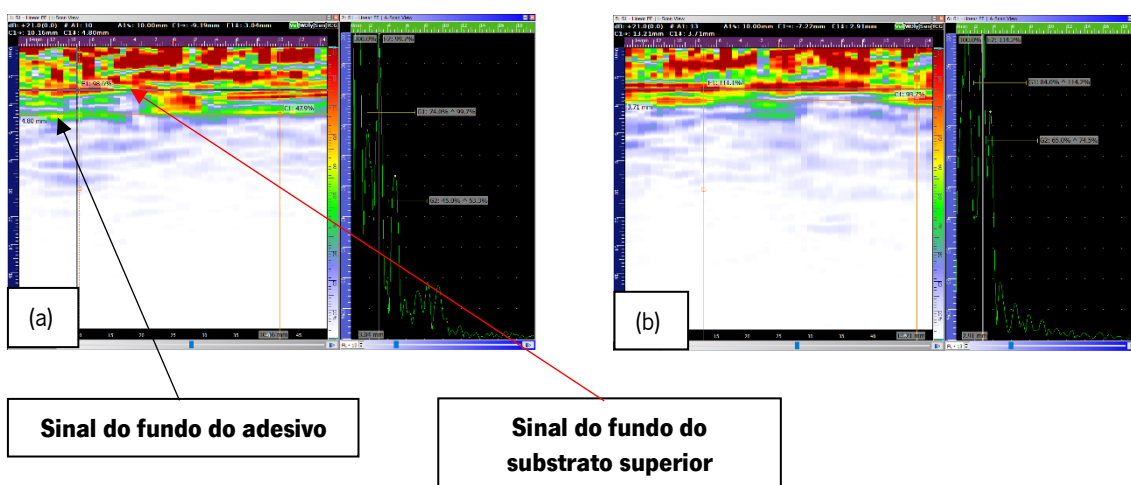


Figura 150: Scans relativos à junta P7 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.

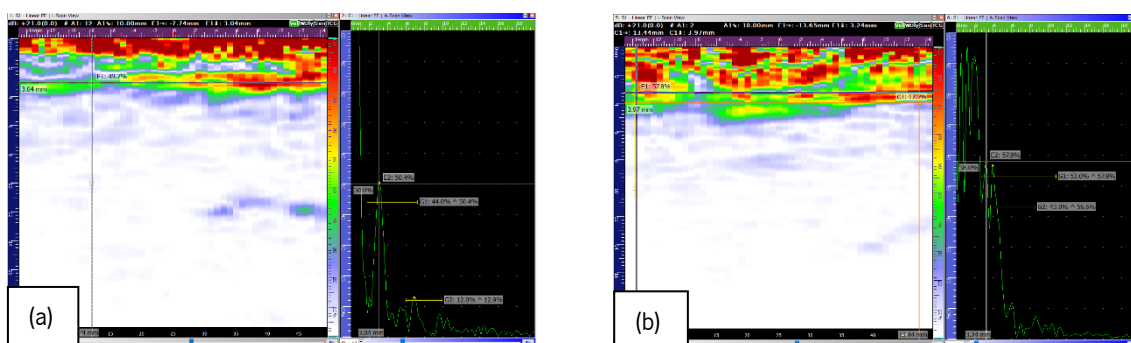


Figura 151: Scans relativos à junta P10 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta antes do ensaio de tração.

Observou-se na vista *L-Scan* das Figuras 147 a 151, uma elevada reflexão do sinal, ao longo da espessura do substrato superior (zonas de cor vermelha), dificultando assim, a visualização do reflexo da superfície e do fundo deste substrato. Isto é atribuído ao efeito conjunto da elevada reflexão provocada pelas fibras de vidro, do ganho elevado (21 dB), bem como, da presença de bolhas nos substratos, resultantes do processo de produção VARI. Também é visível na superfície

do substrato superior, algumas zonas sem sinal ou com diminuição significativa do sinal. Isto poderá estar relacionado com a formação de bolhas, durante a aplicação do acoplante, que resultaram numa ineficiente transmissão das ondas sonoras.

Como as propriedades (p. ex. massa volúmica e rigidez) do adesivo estrutural de epóxico são semelhantes às da matriz termoendurecível de epóxico dos substratos, não se detetaram nos *scans*, alterações significativas no sinal de UT na interface substrato superior/adesivo.

Algumas juntas parecem apresentar defeitos internos, provavelmente serão vazios, pois surgem falhas no sinal de UT relativo ao fundo do adesivo. Isto pode ser observado na representação *L-Scan* das Figuras 147 (a), 148 (a), 149 (b), 152 (a) a 155 (a).

Nas Figuras 152 a 161 são apresentados os resultados obtidos por UT, para os provetes P3, P4, P6, P8 e P9, antes e após a realização dos ensaios de tração.

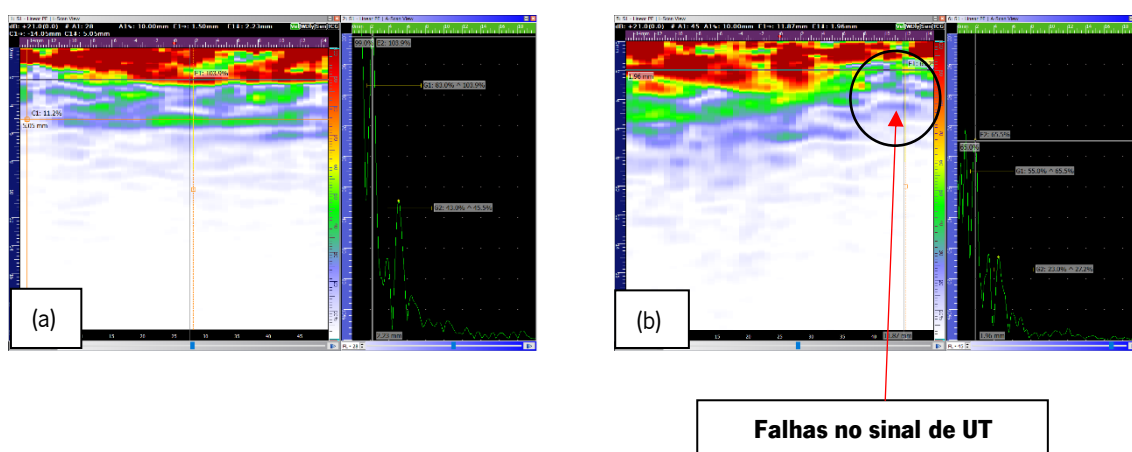


Figura 152: *Scans* relativos à junta P3 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.

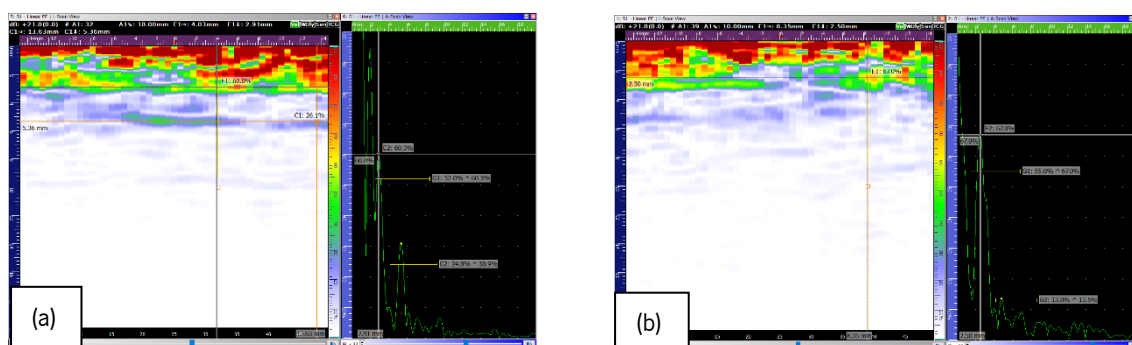


Figura 153: *Scans* relativos à junta P3 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.

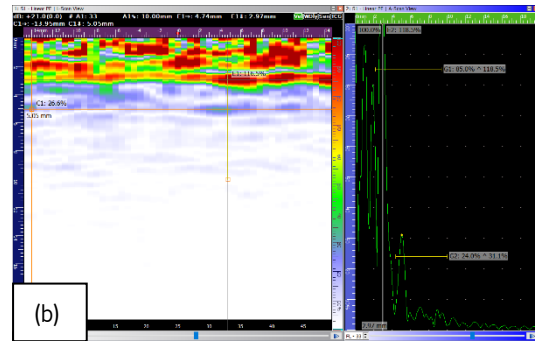
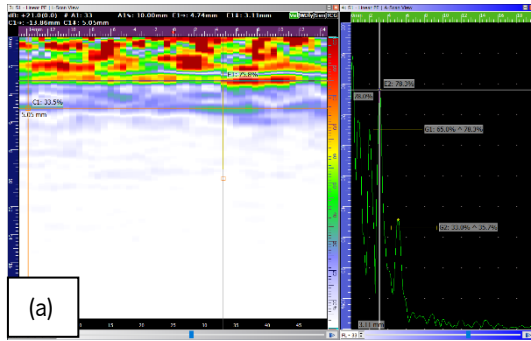


Figura 154: Scans relativos à junta P4 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.

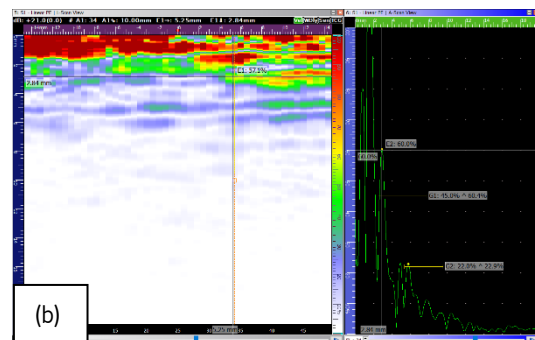
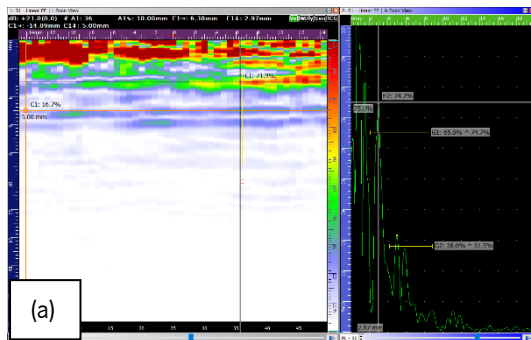


Figura 155: Scans relativos à junta P4 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.

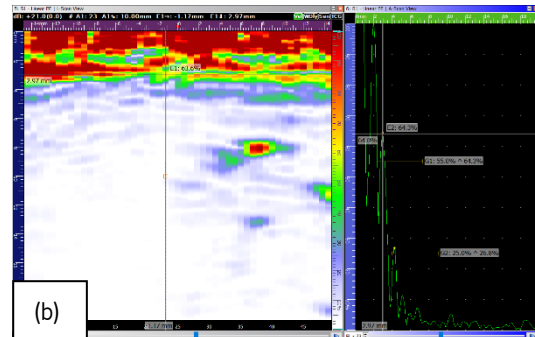
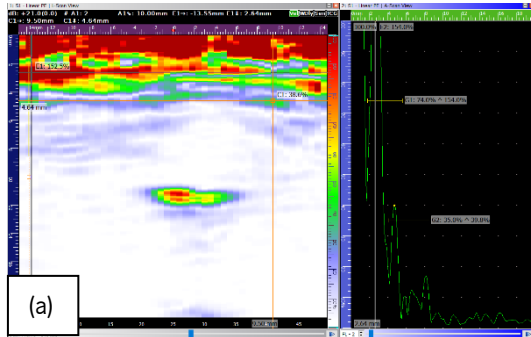


Figura 156: Scans relativos à junta P6 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.

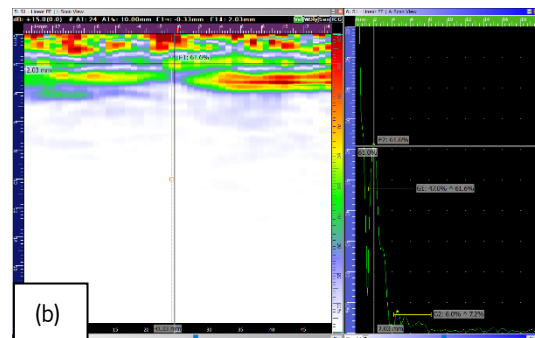
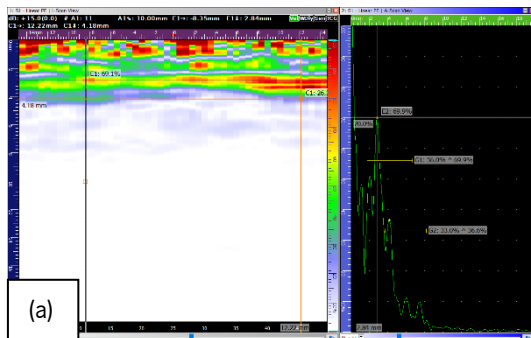


Figura 157: Scans relativos à junta P6 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.

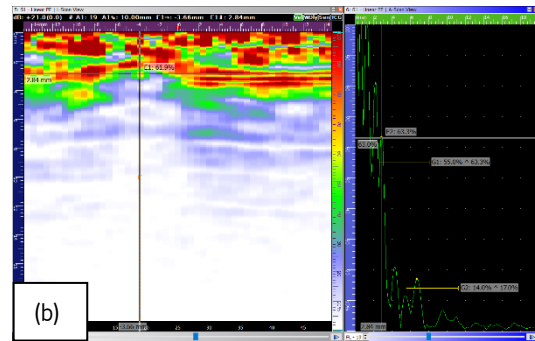
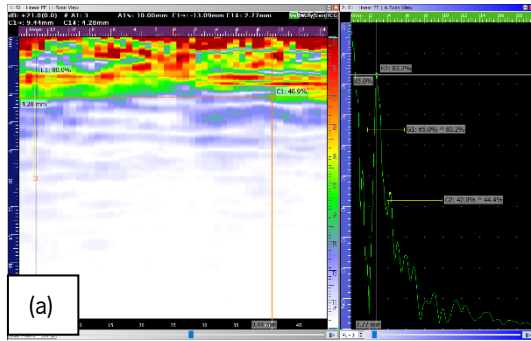


Figura 158: Scans relativos à junta P8 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.

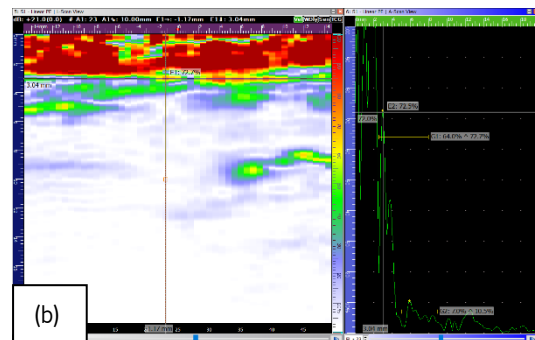
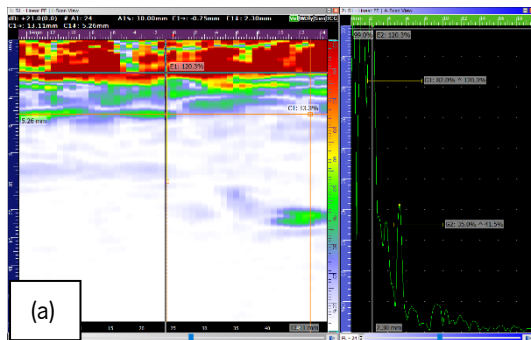


Figura 159: Scans relativos à junta P8 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.

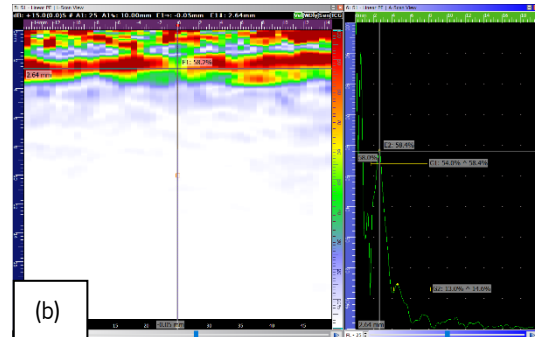
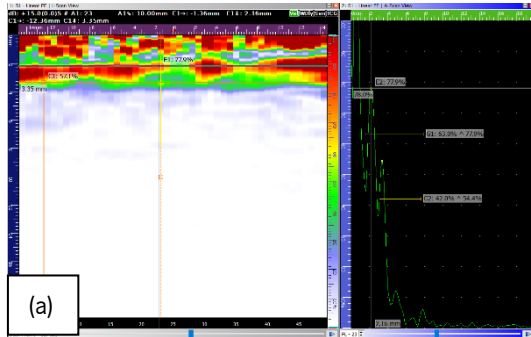


Figura 160: Scans relativos à junta P9 – (a) lado A da junta antes do ensaio de tração; (b) lado A da junta após o ensaio de tração.

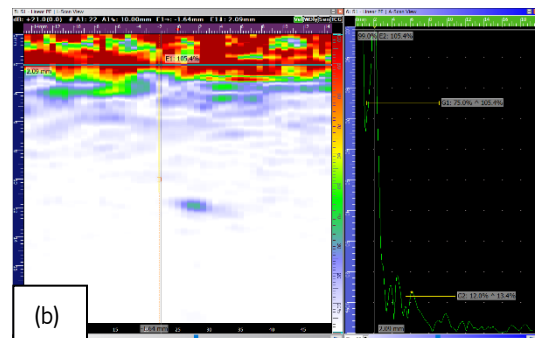
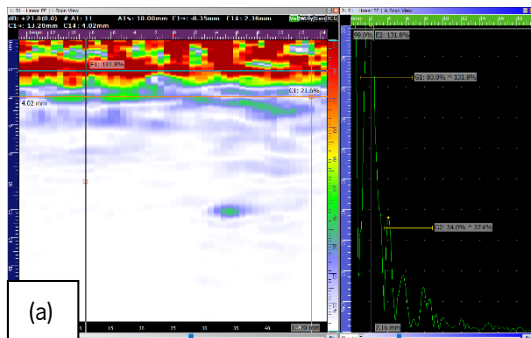


Figura 161: Scans relativos à junta P9 – (a) lado B da junta antes do ensaio de tração; (b) lado B da junta após o ensaio de tração.

Na representação *L-Scan* das Figuras 152 (b) a 161 (b), verificou-se que o dano induzido originou uma descontinuidade nas juntas, resultando em falhas no sinal de UT (sem sinal ou com diminuição da amplitude do sinal) quer na interface substrato superior/adesivo quer no fundo do adesivo. Como na zona de dano ocorreu a rotura interlaminar da superfície do substrato, as ondas de ultrassom deixaram de se propagar para o adesivo.

A partir da vista *L-Scan* foi possível estimar a espessura do adesivo aplicado nas juntas de sobreposição simples. Esta espessura foi medida na direção vertical (ao longo da espessura) e corresponde à média dos valores de distância entre o fundo do substrato superior e o fundo do adesivo, obtidos por UT para os lados A e B das juntas. Para a obtenção da espessura do adesivo através dos *scans* relativos à superfície frontal e oposta das juntas, recorreu-se a dois eixos horizontais da representação *L-Scan*, em que um deles foi posicionado na profundidade do fundo do substrato superior, enquanto o outro foi colocado na profundidade do fundo do adesivo. Por exemplo, a Figura 162 indica que a espessura do adesivo é de 1,75 mm no lado A da junta P2 ($4,59 - 2,84 = 1,75$ mm), enquanto no lado B é de 2,44 mm ($4,80 - 2,36 = 2,44$ mm), resultando numa espessura média de adesivo de 2,10 mm.

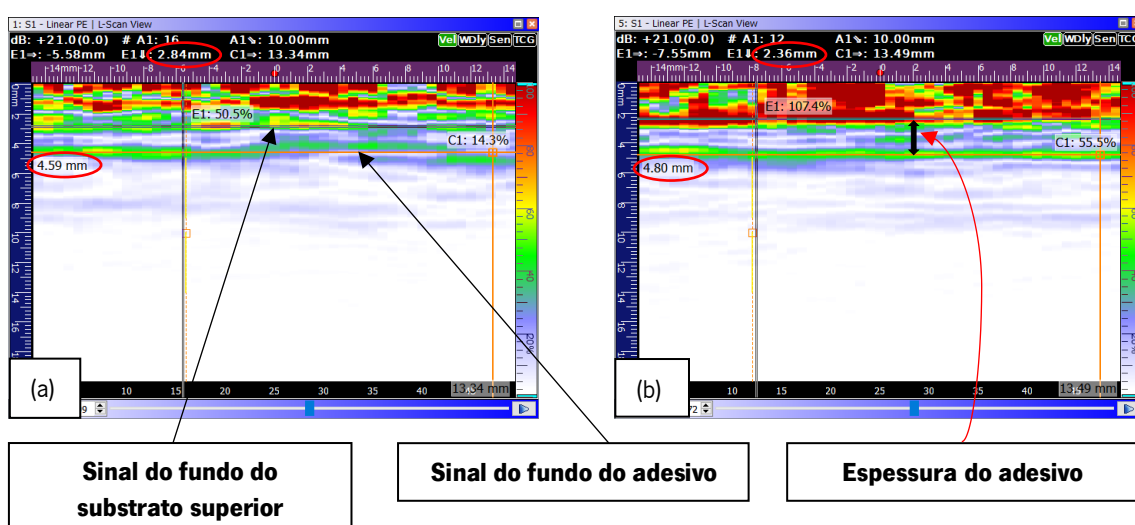


Figura 162: *Scans* relativos à junta P2 – (a) lado A da junta; (b) lado B da junta.

Com o recurso a um dispositivo de medição de espessura, determinou-se a espessura média dos substratos (superior e inferior) e da zona de sobreposição de cada junta, de modo a se obter a espessura nominal de adesivo. Na Tabela 41 são indicadas as espessuras determinadas por UT, para cada junta.

Tabela 41: Espessura do adesivo dado por UT para cada provete.

Designação das juntas adesivas	Espessura do adesivo dado por UT – lado A [mm]	Espessura do adesivo dado por UT – lado B [mm]	Espessura média do adesivo dado por UT [mm]	Espessura nominal do adesivo [mm]
P1	1,62	1,67	1,65	0,53
P2	1,75	2,44	2,10	0,63
P3	2,82	2,45	2,64	1,00
P4	1,94	2,03	1,99	0,83
P5	1,21	1,77	1,49	0,39
P6	2,00	1,34	1,67	0,70
P7	1,76	0,80	1,28	0,55
P8	1,51	2,96	2,24	0,72
P9	1,19	1,86	1,53	0,52
P10	-	0,73	0,77	0,36

A Tabela 41 indica um sobredimensionamento da espessura do adesivo por parte da técnica de ultrassons.

5. Conclusões

Com o presente trabalho pretendeu-se estudar, avaliar e caracterizar defeitos em laminados em material compósito, utilizando a técnica de inspeção não destrutiva de ultrassons. Do estudo desenvolvido e apresentado foi possível obter as conclusões mostradas nos pontos seguintes.

1) Em relação ao dano na execução de furos não passantes num laminado de fibra de vidro/epóxico:

- A execução deste tipo de furos provocou delaminação à entrada;
- Tendência para a diminuição da extensão da região delaminada com o aumento do diâmetro da broca;
- Um furo não passante é detetado por ultrassons, porque a sua execução produziu uma descontinuidade no material, resultando na inexistência de sinal do fundo do laminado;
- A partir da análise UT foi possível verificar a presença do dano de delaminação, sendo este restrito à região circundante de cada furo.

2) No que concerne ao dano na execução de furos passantes num laminado de fibra de vidro/epóxico:

- A execução deste tipo de furos causou delaminação à entrada e à saída;
- Ligeira tendência para a diminuição da extensão da delaminação com o aumento do diâmetro da broca;
- A presença de um furo passante é assinalada pela inexistência do reflexo relativo à superfície e face oposta do laminado;
- A delaminação à saída dos furos levou a um deficiente controlo da sonda durante a inspeção, resultando em *scans* de fraca qualidade, que impossibilitaram a observação do dano ao longo da espessura do laminado.

3) Relativamente ao efeito no sinal de UT provocado pelas inclusões inseridas no laminado de fibra de vidro/epóxico:

- Quanto menor foi o tamanho de uma inclusão, maior foi a facilidade das ondas de ultrassom em “contorná-la” e, consequentemente, menos esbatido se apresentou o fundo do laminado;

-
- As inclusões de *peel ply* (10×10 mm², 4×4 mm²), fita adesiva (10×10 mm², 8×8 mm²), PET/Al/PE (7×7 mm²) e *Teflon™* (4×4 mm², 5×5 mm²) refletiram o sinal, praticamente, na sua totalidade, deixando o fundo do laminado de ser detetado, o que significa que as ondas de ultrassom quase não se propagaram ao longo da espessura destas inclusões;
 - As inclusões de alumínio (3×3 mm², 6×6 mm²) e de filme de vácuo (5×5 mm²) para além de terem refletido as ondas sonoras, também permitiram a transmissão do som, sendo a superfície oposta do laminado detetada;
 - À medida que a espessura do laminado aumentou, a detetabilidade do sinal do fundo tornou-se cada vez menor, devido ao efeito crescente da atenuação;
 - O aumento do ganho associado à também elevada reflexão provocada pelas fibras de vidro originou zonas de elevado ruído, que dificultaram a deteção das inclusões, assim como, a observação na vista *L-Scan* do reflexo relativo à superfície do laminado;
 - Ligeira tendência para um aumento do desvio entre os resultados teóricos da profundidade e os valores obtidos por UT, com o aumento da profundidade das inclusões.

4) Em relação ao dano provocado por diferentes níveis de energia de impacto, em laminados de fibra de vidro/epóxico e de carbono epóxico:

- O impacto de energia 80,3 J causou a perfuração dos laminados de fibra de vidro/epóxico e de carbono/epóxico;
- O impacto de energia 10 J originou junto à região de contacto do impactor, fissuras matriciais nos laminados de fibra de vidro/epóxico e de carbono/epóxico, enquanto na superfície oposta provocou uma saliência, sendo também visível fissuras na matriz;
- A partir da inspeção visual das placas de fibra de vidro/epóxico submetidas aos impactos de energia entre 1 J e 10 J, constatou-se que a área de delaminação foi tanto maior quanto maior foi a energia de impacto;
- As solicitações de impacto de energia 4,5 J a 10 J originaram junto ao local de embate do impactor, pequenas fissuras na matriz dos laminados de carbono/epóxico, verificando-se um aumento da indentação superficial com o aumento da energia de impacto;
- O impacto de energia 4 J não causou danos passíveis de serem detetados quer por inspeção visual quer por ultrassons nos laminados de carbono/epóxico;
- As solicitações de impacto de energia 2,5 J, 5 J e 10 J, no caso dos laminados de fibra de vidro/epóxico, e 4,5 J a 10 J, no caso de laminados de carbono/epóxico, originaram

-
- no local de embate a rotura da matriz e/ou fibras, resultando na descontinuidade do material e, consequentemente, do sinal de ultrassons;
- Os impactos de energia entre 1 J e 2 J não originaram uma diminuição/falha no reflexo da superfície dos laminados de fibra de vidro/epóxico;
 - Tanto em placas de fibra de vidro/epóxico como de carbono/epóxico, as delaminações pareceram surgir como falhas no sinal de UT, junto à superfície de impacto. Para além disso, as solicitações de impacto provocaram nos laminados, um dano de formato cónico, verificando-se um fenómeno de crescimento das delaminações ao longo da espessura, à medida que a distância à superfície solicitada aumentou;
 - Os resultados obtidos por UT para os laminados de fibra de vidro/epóxico e de carbono/epóxico revelaram que, o comprimento do dano cónico foi tanto maior quanto maior foi a energia de impacto.

5) Acerca do dano induzido por diferentes níveis de força, em provetes de fibra de vidro/epóxico solicitados à flexão:

- Não foi verificada uma correlação entre a força aplicada e a deformação resultante;
- Durante o ensaio de flexão ocorreu compressão nas lâminas junto à região de contacto do rolete de carregamento, pelo que, os laminados apresentaram danos locais como indentação superficial, quebra da matriz sem rotura de fibras e delaminação. Por outro lado, as lâminas junto à superfície oposta foram solicitadas à tração, verificando-se para forças suficientes, a rotura das fibras e da matriz;
- Não foi verificada uma correlação entre a força aplicada e a severidade dos danos;
- A compressão exercida pelo rolete de carregamento, causou a rotura da matriz de epóxico, resultando na descontinuidade do material e, consequentemente, do sinal de ultrassons;
- As delaminações pareceram surgir como falhas no sinal de UT, junto à superfície de carregamento. Para além disso, as solicitações de flexão provocaram nos provetes, um dano de formato cónico, em que o tamanho das delaminações aumentou das interfaces situadas junto à superfície solicitada, para as interfaces situadas mais longe dessa mesma superfície;
- Os resultados obtidos a partir da técnica de UT não mostraram uma correlação entre a força aplicada e a extensão do dano.

6) No que diz respeito ao dano causado por diferentes cargas, em juntas adesivas de sobreposição simples solicitadas à tração:

- Nos casos em que se verificou a rotura total das juntas, o adesivo estrutural de epóxico *Elantas Elan-tech® AS 89.1/ AW 89.2 – ADH 891.892* evidenciou um comportamento frágil, pois ocorreu uma diminuição brusca da força sem deformação plástica;
- O aumento da largura da sobreposição de 25 mm para 50 mm, mantendo o mesmo comprimento da ligação (25,5 mm), resultou num aumento da força máxima aplicada;
- Quando ocorreu a rotura total das juntas, esta aconteceu sempre na interface entre o adesivo e um dos substratos de fibra de vidro/epóxico, verificando-se o arrancamento de fibras (modo de rotura *light-fiber-tear failure* – LFT);
- O processo de rotura das juntas iniciou-se nas extremidades do comprimento de sobreposição;
- Nas juntas de área de sobreposição de 25×25,5 mm² foi verificada uma relação entre o dano induzido e a força aplicada;
- Não foi verificada uma correlação entre a extensão do dano e a força aplicada nas juntas de área de sobreposição 50×25,5 mm²;
- Algumas juntas pareceram apresentar defeitos internos, provavelmente serão vazios, pois surgiram falhas no sinal de UT relativo ao fundo do adesivo;
- O dano induzido originou uma descontinuidade nas juntas, resultando em falhas no sinal de UT (sem sinal ou com diminuição da amplitude do sinal) quer na interface substrato superior/adesivo quer no fundo do adesivo;
- Sobredimensionamento da espessura do adesivo por parte da técnica de ultrassons.

Em suma, a técnica de ultrassons por reflexão revelou-se uma solução eficaz na deteção e quantificação da extensão de defeitos e danos como inclusões e delaminação, ao longo da espessura das amostras.

6. Sugestões para trabalhos futuros

O trabalho de investigação desenvolvido na presente dissertação pretende contribuir para melhor compreender a área da inspeção não destrutiva de componentes e estruturas em material compósito. É evidente que as técnicas de controlo não destrutivo, em particular, os ultrassons, têm bastante espaço para evoluir, de modo a garantir um controlo de qualidade, cada vez mais rigoroso das peças feitas com materiais compósitos.

Essencialmente, pretende-se sistematizar o estudo de defeitos induzidos, pelo que, para dar continuidade à investigação desenvolvida neste trabalho, sugerem-se as seguintes tarefas:

- Investigar diferentes orientações e percentagens de fibras de reforço;
- Relacionar o sinal de ultrassons com tipos de dano;
- Experimentar outras técnicas de produção de materiais compósitos, assim como, fabricar componentes com geometrias complexas;
- Submeter as amostras a outros tipos de solicitações mecânicas.

Bibliografia

- [1] Jean-Marie Berthelot. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. Terceira edição. Vallouise, França. Cap.1, pp. 3,4,5-6. Cap.2, pp. 19, 27, 30. Cap.3, pp. 50-52.
- [2] Henrique Pereira da Silva. *Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados*. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra. Coimbra. 2014.
- [3] Manuel Francisco de Sousa Ferreira de Moura. *Modelos de previsão do comportamento mecânico de materiais compósitos de carbono-epóxico sujeitos a impacto de baixa velocidade e da sua resistência residual à compressão após impacto*. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto. 1995.
- [4] Marcelo F. S. F. de Moura, Alfredo B. de Moraes, António G. de Magalhães. *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Segunda edição. Publindústria, Edições Técnicas. Porto. 2011. Cap.1, pp. 2-3, 11-12, 16-18, 21, 29. Cap.2, pp. 59-61. Cap.10, pp. 273-274, 275, 278. Cap.11, pp. 327-330. Cap.12, pp. 345, 352-354, 356-357, 360. ISBN 978-972-8953-73-7.
- [5] H. Thomas Yolken, George A. Matzkanin. *Nondestructive Evaluation of Advanced Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites - A Technology Assessment*. NASA/CR-2009-215566. 2009.
- [6] ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade. *Tecnologia & Qualidade – Aeronáutica e Aeroespacial*. Série IV//n.º02. Abril. 2016. (8 de Outubro de 2019). Retirado de: <https://www.isq.pt/wp-content/uploads/sites/78/2016/09/tq02.pdf>
- [7] Carlos A. X. Ramos. *Materiais Compósitos Inteligentes*. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto. 2006.
- [8] Gurit®. *Guide to Composites*. (16 de Julho de 2019). Cap.1, pp. 4-5. Cap.5, pp. 19-20, 24, 28-30. Cap.6, pp. 49. Retirado de: <http://gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>
- [9] Ana C. F. M. Duro. *Desenvolvimento e caracterização de compósitos reforçados com fibras de linho e sisal*. Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Guimarães. 2013.

-
- [10] F. L. Matthews, R. D. Rawlings. *Composite Materials: Engineering and Science*. Primeira edição. Woodhead Publishing Limited. 1994. Cap.1, pp.5. Cap.5, pp. 168, 191. Cap.12, pp. 364. Cap.14, pp. 392. ISBN 978-1-85573-473-9.
- [11] P. K. Mallick. *Processing of Polymer Matrix Composites*. Primeira edição. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2017. Cap.1, pp. 5-6, 9,10-11. Cap.3, pp. 77-80, 84. Cap.4, pp. 143-145. Cap.7, pp. 204. Cap.11, pp. 293-295, 302-309. ISBN 978-1-4665-7822-7.
- [12] Maria da Conceição Jesus Rego Paiva. *Introdução aos Polímeros: Introdução aos Polímeros*.pdf. Departamento de Engenharia de Polímeros. Universidade do Minho. Guimarães. 2014.
- [13] Todd Johnson. 2019. *Thermoplastic vs. Thermoset Resins*. (16 de Julho de 2019). Retirado de: <http://thoughtco.com/thermoplastic-vs-thermoset-resins-820405>
- [14] A. Brent Strong. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*. Segunda edição. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn. Michigan. 2008. Cap.2, pp. 28. Cap.8, pp. 200, 205. Cap.10, pp. 301-302. Cap.16, pp. 422. ISBN 0-87263-854-5.
- [15] João Pedro Gil Nunes. *Termoendurecíveis: 1_Introdução*.pdf. Departamento de Engenharia de Polímeros. Universidade do Minho. Guimarães. 2016.
- [16] Charles A. Harper. *Handbook of Plastics, Elastomers & Composites*. Quarta edição. The McGraw-Hill Companies, Inc.. 2002. Cap.2, pp. 164. ISBN 9780071384766.
- [17] United States of America - Department of Defense. *Department of Defense Handbook, Composite Materials Handbook, Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design and Analysis*. Volume 3. Estados Unidos da América. 2002. Cap.2, pp. 30. Cap.3, pp. 5. Cap.7, pp. 26. Cap.8, pp. 21, 23.
- [18] F. C. Campbell. *Manufacturing Processes For Advanced Composites*. Primeira edição. Elsevier Advanced Technology. 2004. Cap.1 pp. 7, Cap.2, pp. 40-41. Cap.6, pp. 185. Cap.9, pp. 349, 352. Cap.13, pp. 473-477, 480. ISBN 1856174158.
- [19] Ivo Emanuel Gonçalves da Costa. *Estudo do comportamento de estruturas sandwich com núcleos de cortiça para pás de turbinas eólicas*. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto. 2009.

-
- [20] Manuel Daniel da Mota Magalhães. *Cálculo e projeto de banco para automóvel desportivo em materiais compósitos*. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto. 2015.
- [21] António Joaquim Mendes Ferreira. *Modelos numéricos para a análise de estruturas laminadas compósitas e sandwich*. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto. 1996.
- [22] Daniel B. Miracle, Steven L. Donaldson. *ASM Handbook Composites*. Volume 21. ASM International. 2001. Cap. Vacuum Infusion, pp. 1184-1190. Cap. Nondestructive Testing, pp. 1621-1631. ISBN 0-87170-703-9.
- [23] Rodrigo Augusto Veríssimo Sousa Franco. *Produção de componentes em materiais compósitos por infusão de resina*. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 2008.
- [24] A. Sheno, R. Beck, D. Boote, P. Davies, A. Hage, D. Hudson, K. Kageyama, J. A. Keuning, P. Miller, L. Sutherland. *ISSC Committee V.8 – Sailing Yacht Design. Proceedings of the 17TH International Ship and Offshore Structures Congress*. Volume 2. Seoul National University. 2009. Cap. Hulls, pp. 454-455. ISBN 978-89-954730-1-6.
- [25] Infusão por Vácuo – Fibrenamics Green. (17 de Julho de 2019). Retirado de: <http://green.fibrenamics.com/infusao-por-vacu>
- [26] Rúnar Unnthórsson, M. T. Jonsson, T. P. Runarsson. *NDT Methods For Evaluating Carbon Fiber Composites*. 2014.
- [27] A. Fahr, A. Y. Kandeil. *Ultrasonic C-Scan Inspection of Composite Materials. Engineering Journal of Qatar University*. Volume 5. p. 201-222. 1992.
- [28] Nikolaos Angelopoulos. *Damage detection and damage evolution monitoring of composite materials for naval applications using acoustic emission testing*. Universidade de Birmingham. 2017.
- [29] R. A. Smith. *Materials Science and Engineering – Composite Defects and Their Detection*. Volume III. UNESCO Encyclopedia of Life Support System (EOLSS). p. 104, 108, 111, 112.
- [30] Rikard Benton Heslehurst. *Defects and Damage in Composite Materials and Structures*. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2014. Cap. 2, pp. 32-56. ISBN 978-1-4665-8048-0.

-
- [31] Eric Greene. *SSC-463 Inspection Techniques for Marine Composite Construction and NDE*. United States Ship Structure Committee. Washington DC. Cap.2, pp. 11, 18, 20, 26, 28, 31-32. 2012.
- [32] Luís Miguel P. Durão, Daniel J. S. Gonçalves, João Manuel R. S. Tavares, Victor Hugo C. de Albuquerque, A. Monteiro Baptista. *Dano na Furação de Placas Carbono/Epóxico*. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Volume 17 (1): 27-38. 2013.
- [33] Oscar Nicolau Gomes Andrade. *Estudo de delaminação em compósitos de matriz polimérica*. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto. 2013.
- [34] David K. HSU. *Nondestructive Inspection of Composite Structures: Methods and Practice*. 17th World Conference on Nondestructive Testing. Shanghai. China. 2008.
- [35] Gabriella Faur-Csukat. *A Study on the Ballistic Performance of Composites*. Macromolecular Symposia, 239: 217-226. 2006. DOI: 10.1002/masy.200650728.
- [36] Tiziana Segreto, Roberto Teti, Valentina Lopresto. *Non-Destructive Testing of Low-Velocity Impacted Composite Material Laminates through Ultrasonic Inspection Methods*. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.80573.
- [37] Arnaldo Manuel Guedes Pinto. *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto. 2007.
- [38] Ensaios Não Destrutivos Convencionais – Grupo ISQ. (17 de Julho de 2019). Retirado de: <https://www.isq.pt/servico-detelhe/ensaios-nao-destrutivos-convencionais/>
- [39] S. Gholizadeh. *A review of non-destructive testing methods of composite materials*. Procedia Structural Integrity. (1): 050-057. 2016.
- [40] 3ª Conferência Nacional em Ensaios Não Destrutivos – Novos desafios de aplicação. Estado Maior da Força Aérea (EMFA). Amadora. Portugal. 2014. (7 de Janeiro de 2020). Retirado de: <http://www.relacre.pt/assets/relacreassets/files/commissionsandpublications/livro-end.pdf>
- [41] Ajay Kapadia. *Best Practice Guide: Non-Destructive Testing of Composite Materials*. National Composites Network (NCN). TWI Ltd. Cap.3, pp. 2. Cap.5, pp. 4-10, 29-30.

-
- [42] António Gonçalves de Magalhães. *Aplicação das técnicas de emissão acústica e radiografia na caracterização do dano produzido por fluência em juntas de materiais compósitos sujeitas a diferentes condições ambientais*. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto. 1999.
- [43] Dr. Ala Hijazi. *Introduction to Non-Destructive Testing Techniques - Ultrasonic Testing*. 1-36. (19 de Julho de 2019). Retirado de: <https://eis.hu.edu.jo/ACUuploads/10526/Ultrasonic%20Testing.pdf>
- [44] André Filipe da Conceição Cereja. *Phased Array inspection system applied to complex geometry carbon fibre reinforced polymer parts*. Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa. 2015.
- [45] Manjunath Rao Pawar Dasarath Rao. *Review of Nondestructive Evaluation Techniques for FRP Composite Structural Components*. College of Engineering and Mineral Resources. West Virginia University. Morgantown. West Virginia. 2007.
- [46] Pranab Biswal, B. N. Srinivasa Reddy, Pratim. M. Baruah. *Manufacturing Aspects of Fabrication Composite Reference Standard for NDT Ultrasonic Inspection*. Aerospace Composites Division. Bangalore. Índia.
- [47] Mário J. L. Caetano. *Impedância Acústica*. (17 de Julho de 2019). Retirado de: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-acusticas/impedancia-acustica/>
- [48] Adil Ahmed S, Dr. K. S. Badarinarayan, Dr. Noor Ahmed R, Gajendra.G. *Development of Ultrasonic Reference Standards for Defect Characterization in Carbon Fiber Composites*. International Research Journal of Engineering and Technology. Volume 2(7): 2015.
- [49] PH Tool Reference Standards. *Reference Standards Calibration Blocks for the NDT Industry*. (19 de Julho de 2019). Retirado de: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0273/1029/files/phtoolcatalog.pdf>
- [50] W. R. Broughton, M. J. Lodeiro, G. D. Sims, B. Zeqiri, M. Hodnett, R. A. Smith, L. D. Jones. *Standardised Procedures for Ultrasonic Inspection of Polymer Matrix Composites*. ICCM - 12. Paris. 1999.
- [51] Techna NDT. *Composite Standards*. (17 de Julho de 2019). Retirado de: <https://www.technandt.com/>

[52] SAE Aerospace Recommended Practices: ARP5605 Solid Composite Laminate NDI Reference Standards.

[53] ASTM D 7136/D 7136M – 07. *Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event*. ASTM. 2007.

[54] G. A. Schoeppner, S. Abrate. *Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates*. Composites: Part A 31 (2000) 903-915.

[55] Opukuro S. David-West, David H. Nash, William M. Banks. *Low-Velocity Heavy Mass Impact Response of Singly Curved Composites*. Journal of Materials: Design and Applications. Volume 228(1) 17-33. 2014. DOI: 10.1177/1464420713476393.

[56] ASTM D 5573 – 99. *Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. Annual Book of ASTM Standards. Volume 15.03. ASTM. Conshohocken. Estados Unidos da América. 2007.

Anexos

Anexo A

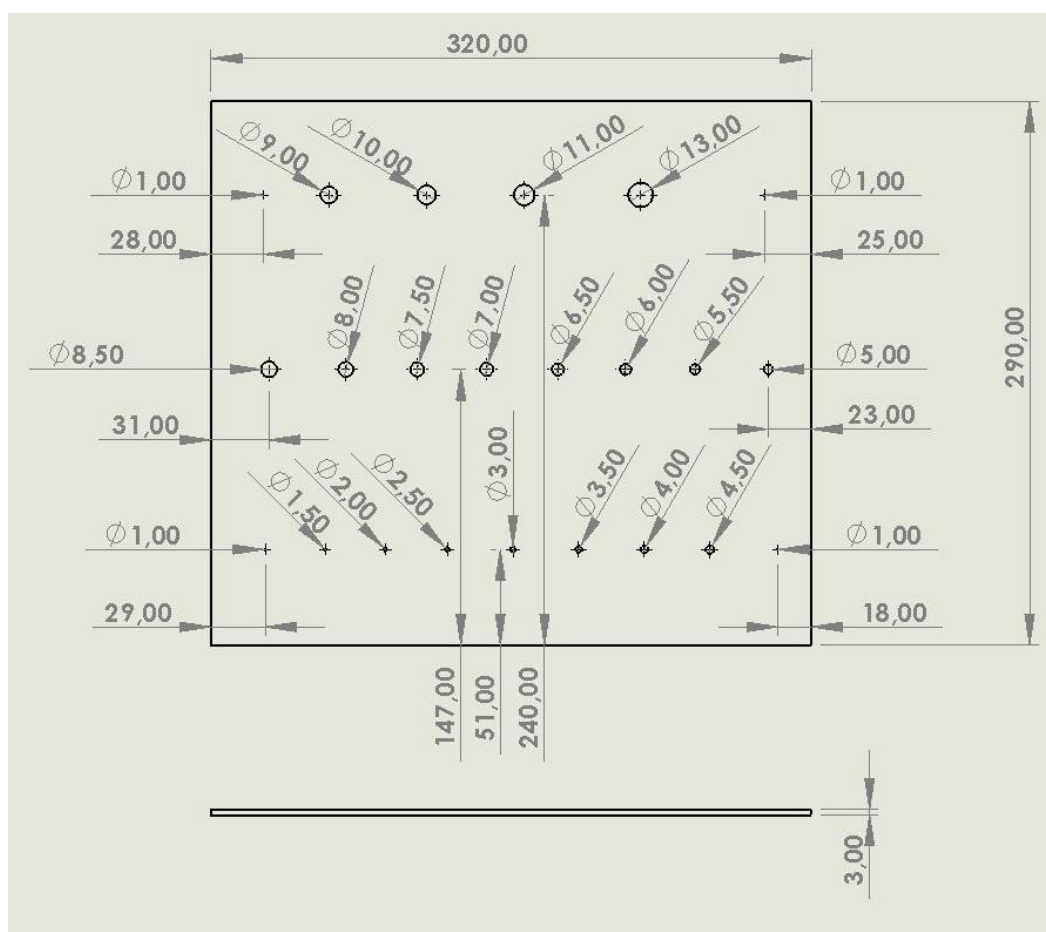


Figura 163: Desenho técnico 2D relativo ao laminado constituído por furos não passantes (dimensões em mm).

Anexo B

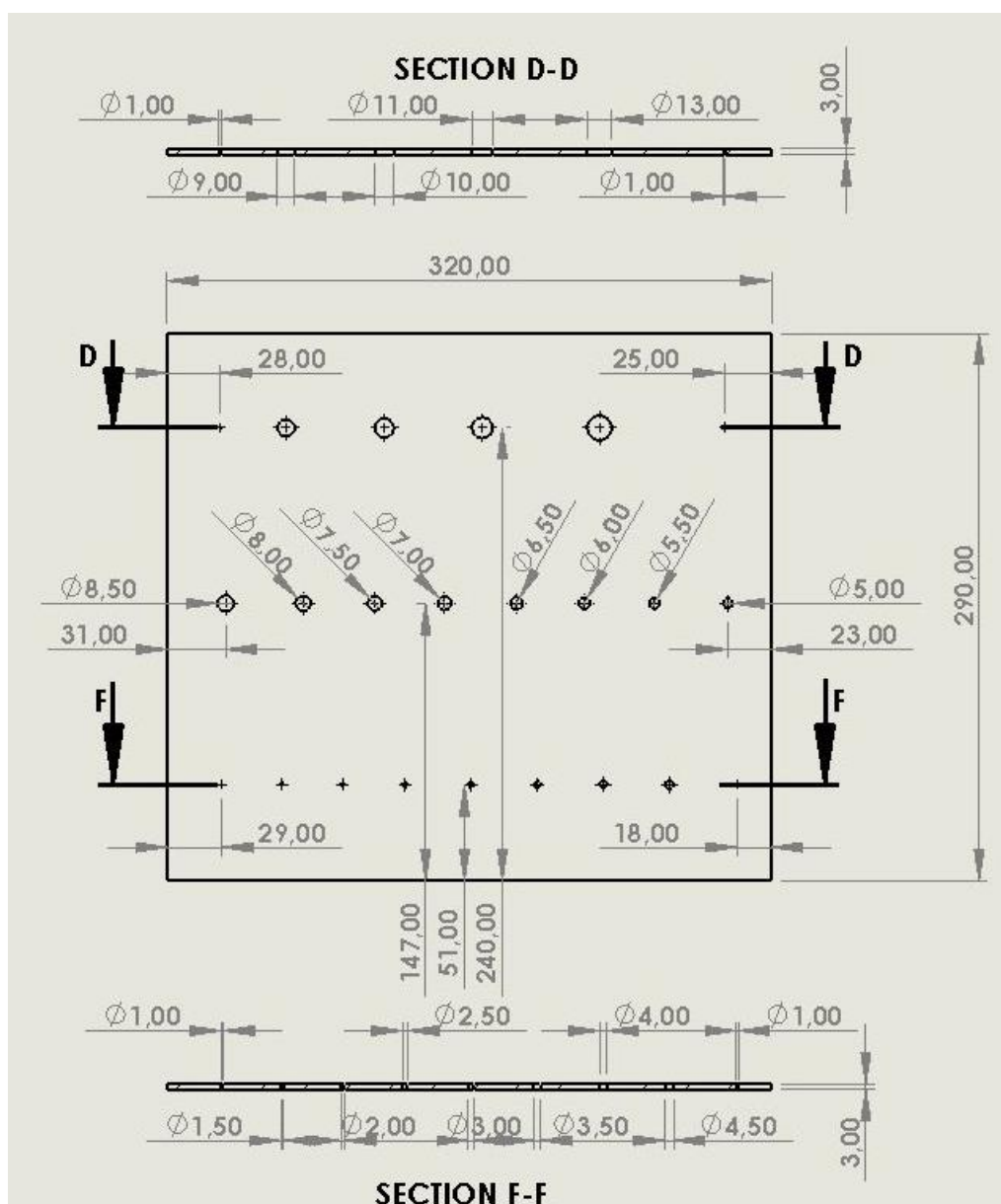


Figura 164: Desenho técnico 2D relativo ao laminado constituído por furos passantes (dimensões em mm).

Anexo C

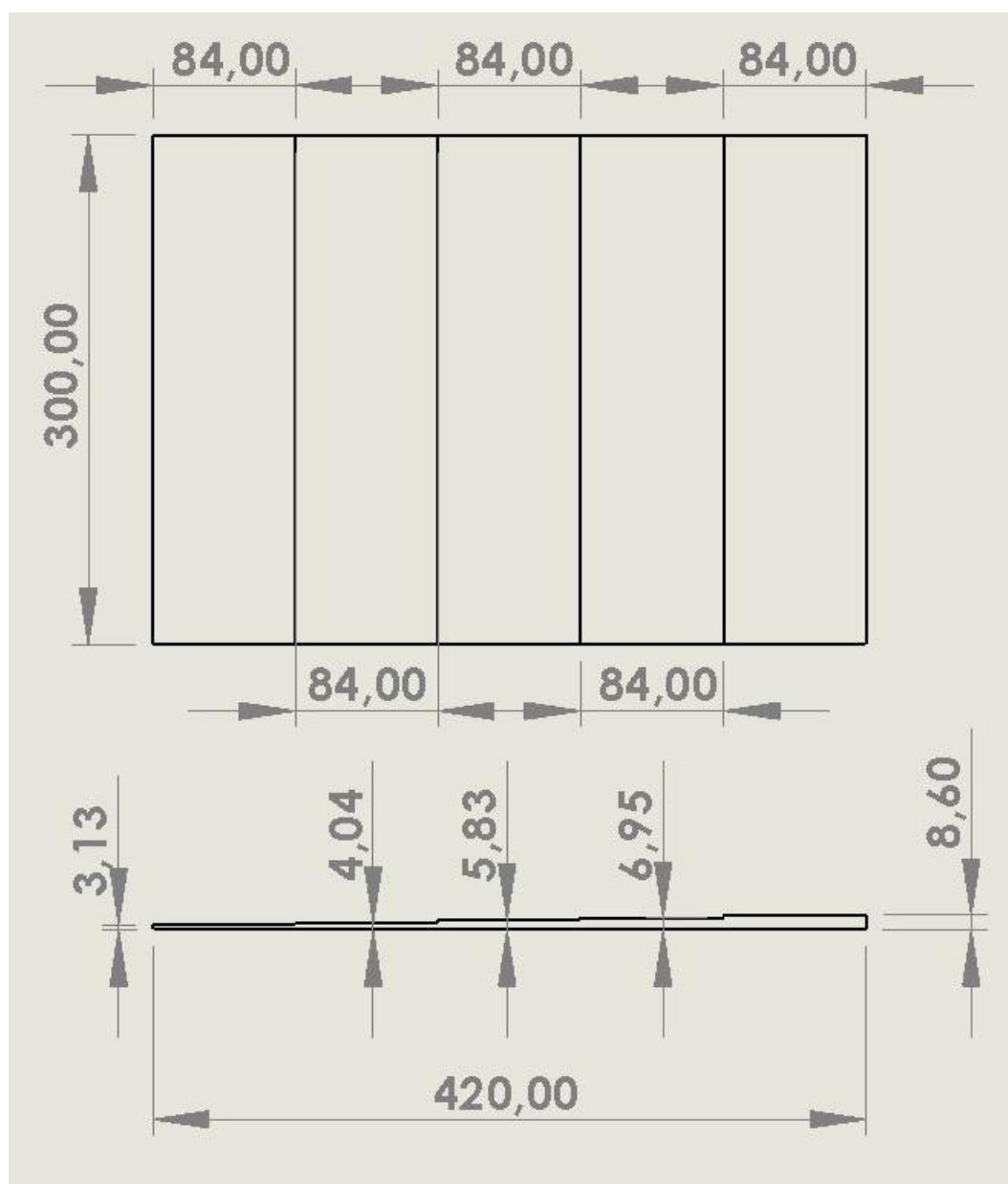


Figura 165: Desenho técnico 2D relativo ao laminado C_1 (dimensões em mm).

Anexo D

Interpretação dos scans

Para facilitar a compreensão dos *scans* ou vistas, de seguida é fornecida uma breve descrição sobre o que cada uma delas apresenta. A representação *A-Scan* é o sinal original da onda de ultrassom, de onde resultam os restantes tipos de representações como o *B-Scan*, *C-Scan* e *L-Scan*. A vista *A-Scan* (ver Figura 166 (b)) indica a amplitude das ondas de ultrassom refletidas em função da profundidade. O *A-Scan* mostra uma série de picos, em que o primeiro e o último representam a reflexão das ondas de ultrassom pela superfície e fundo da amostra a analisar, respetivamente. A presença de um defeito é assinalada pelo aparecimento de um eco entre o pico inicial e o de fundo. A representação *L-Scan* (ver Figura 166 (a)) é basicamente uma vista, que mostra a profundidade/espessura em função da largura da sonda.

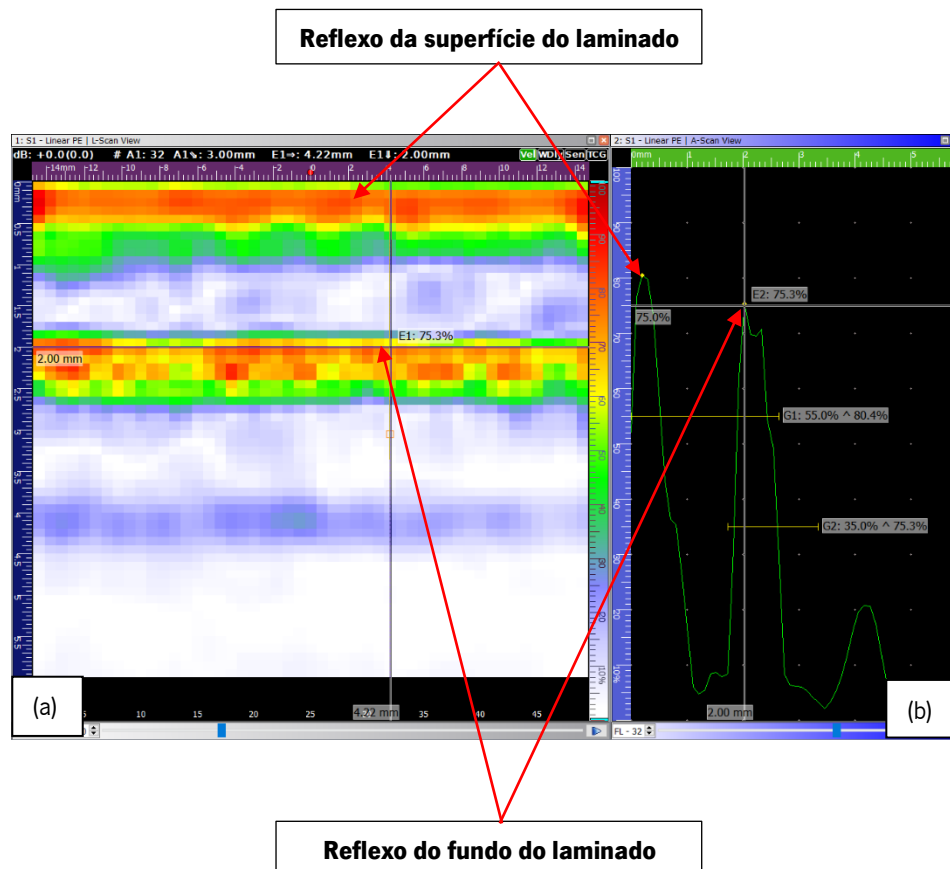


Figura 166: Resultados relativos à análise UT de um laminado de fibra de vidro/epóxico - (a) *L-Scan*; (b) *A-Scan*.

A Figura 167 mostra a distribuição das vistas numa perspetiva 3D.

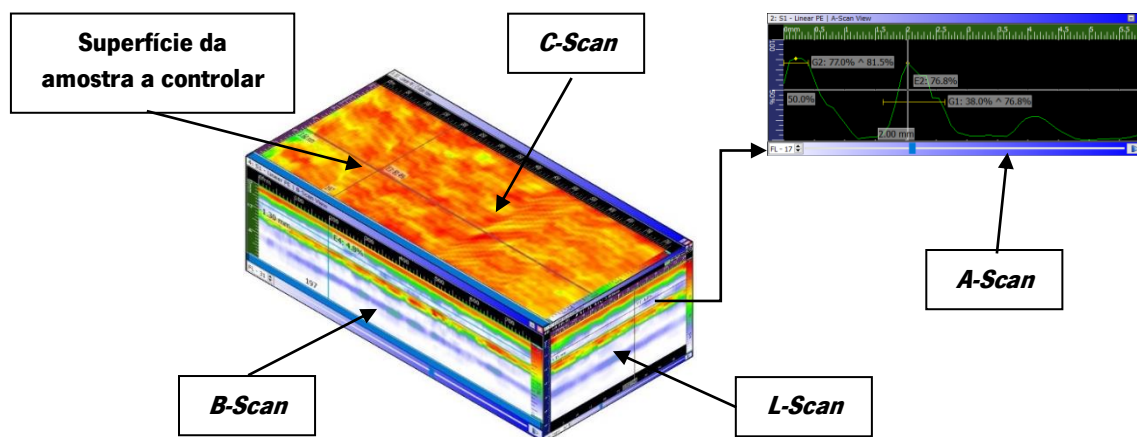


Figura 167: Distribuição das vistas *B-Scan*, *C-Scan* e *L-Scan* numa perspectiva 3D.

Na Figura 166 é possível observar no lado direito da representação *L-Scan*, uma escala de cores, tal como mostra a Figura 168. Cada conjunto de cores representa a amplitude de um sinal refletido. Isto é, um eco de elevada amplitude na representação *A-Scan* é exibido na vista *L-Scan* com as cores vermelho-amarelo, ao passo que, um sinal atenuado aparece com as cores verde-azul.



Figura 168: Escala de amplitude do sinal de UT.

Anexo E

Laminado de fibra de vidro/epóxico constituído por furos não passantes

Tabela 42: Variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca.

Denominações dos furos	Diâmetro nominal da broca [mm]	Fator de delaminação [Fd]
A1	1	2
A2	9	1
A3	10	1
A4	11	1
A5	13	1
A6	1	2
B1	8,5	1
B2	8	1,13
B3	7,5	1,07
B4	7	1,14
B5	6,5	1,23
B6	6	1,08
B7	5,5	1,27
B8	5	1
C1	1	2
C2	1,5	1,33
C3	2	1,5
C4	2,5	1,6
C5	3	1,67
C6	3,5	1,43
C7	4	1,13
C8	4,5	1,33
C9	1	2

Anexo F

Laminado de fibra de vidro/epóxico constituído por furos passantes

Tabela 43: Variação do fator de delaminação em função do diâmetro nominal da broca.

Denominações dos furos	Diâmetro nominal da broca [mm]	Fator de delaminação [Fd]
D1	1	2,5
D2	9	1,33
D3	10	1,4
D4	11	1,18
D5	13	1,31
D6	1	2
E1	8,5	1,29
E2	8	1,5
E3	7,5	1,6
E4	7	1,71
E5	6,5	1,38
E6	6	1,33
E7	5,5	1,64
E8	5	1,4
F1	1	2
F2	1,5	1,67
F3	2	2
F4	2,5	2
F5	3	1,67
F6	3,5	1,71
F7	4	1,75
F8	4,5	1,78
F9	1	2

Anexo G

Laminados de fibra de vidro/epóxico submetidos a impactos de baixa energia

Tabela 44: Variação da área de delaminação em função da energia de impacto.

Designação dos provetes	Energia de impacto [J]	Área de delaminação [mm²]
Placa 1	10,04	50,27
Placa 2	5,04	37,70
Placa 3	2,50	31,42
Placa 7	2,00	25,13
Placa 9	1,74	21,99
Placa 6	1,50	18,85
Placa 8	1,26	15,71
Placa 5	1,00	12,57

Tabela 45: Comprimento do dano cônico dado por UT, em função da energia de impacto.

Designação dos provetes	Energia de impacto [J]	Comprimento do dano cônico [mm]
Placa 1	10,04	20,45
Placa 2	5,04	18,55
Placa 3	2,50	11,51
Placa 7	2,00	10,89
Placa 9	1,74	8,20
Placa 6	1,50	7,88
Placa 8	1,26	5,50
Placa 5	1,00	5,41

Anexo H

Laminados de fibra de vidro/epóxico submetidos a solicitações de flexão em três pontos

Tabela 46: Variação do comprimento do dano cônico obtido por UT, em função da força aplicada.

Denominação das amostras	Força aplicada [N]	Comprimento do dano cônico [mm]
Placa F	651,78	11,23
Placa H	679,80	12,15
Placa I	744,30	17,41
Placa B	763,64	5,63
Placa D	796,65	14,02
Placa C	814,87	12,94
Placa G	827,11	16,08
Placa E	849,44	10,08
Placa J	969,54	17,33